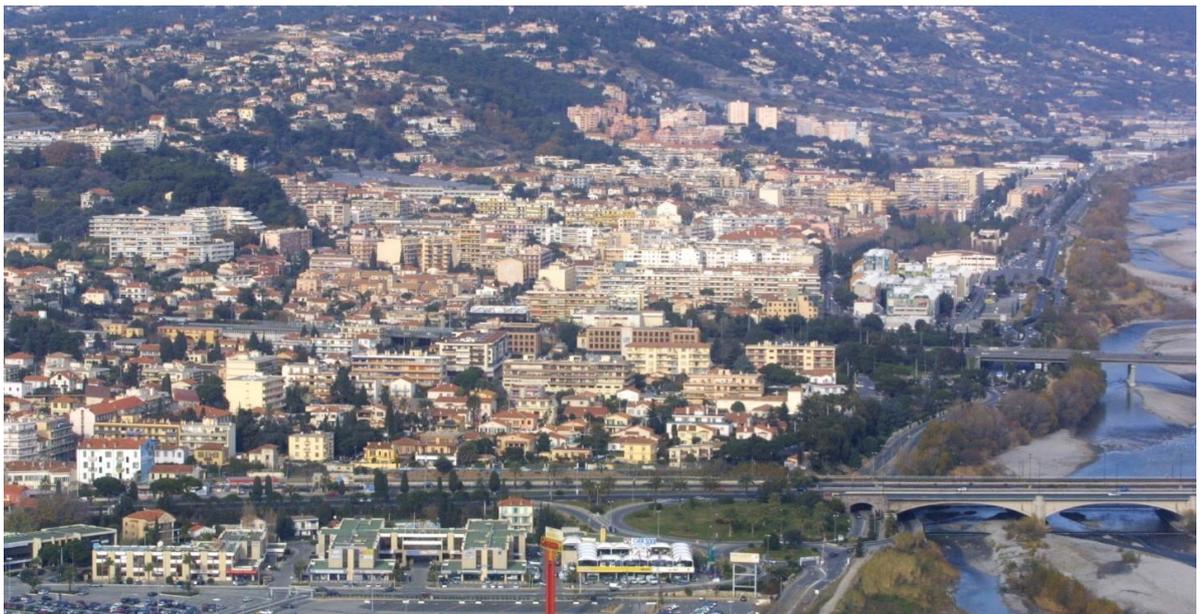


Études préalables au PPR volet sismique de Saint Laurent du Var (06) Définition de l'aléa sismique local

Rapport d'étude, Février 2020

Crédit photo : © Nice-Matin (Philippe Lambert)



Partenaires de l'étude



Études préalables au PPR volet sismique de Saint Laurent du Var (06)

Définition de l'aléa sismique local.

Historique des versions du document

Version	Date	Commentaire
0	02/08/2019	
1	18/12/2019	Relecture EB
2	07/01/2020	Relecture interne CEREMA
3	18/02/2020	Relecture BRGM

Affaire suivie par

Etienne BERTRAND – Agence Sophia Antipolis – Service Risque Sismique
Tél. : 04 97 28 86 48
Courriel : etienne.bertrand@cerema.fr
Site de Sophia Antipolis : Cerema Méditerranée – 500 rte des Lucioles CS80125 Valbonne 06903 Sophia Antipolis Cedex

Références

n° d'affaire : C18MN0036

maître d'ouvrage : DDTM06

Devis n°D18MN0036-1 du 23/10/2018

Rapport	Nom	Date	Visa
Établi par	Etienne BERTRAND	18/12/2019	
Avec la participation de	Julie Régnier, Nathalie Glinsky, Ophélie Rohmer, Amandine Doudelet, Lucile Dodier, Philippe Langlaude, Michel Pernoud, Marie Malascrabes, François Hervouët		
Contrôlé par	Julie Régnier, Nathalie Glinsky, Marie Malascrabes, Agathe Roullé (BRGM)		
Validé par	Raymond Bourg	24/02/2020	

Résumé de l'étude :

Dans le cadre des études préalables au Plan de Prévention du Risque sismique de Saint-Laurent-du-Var, l'aléa sismique local est défini. L'étude de l'aléa local permet de définir une carte de microzonage sismique tenant compte des effets de site lithologiques et topographiques. Cette carte identifie des zones pour lesquelles la réponse sismique est homogène et donc où le mouvement du sol à prendre en compte pour le dimensionnement parasismique des bâtiments est homogène.

SOMMAIRE

1	Introduction	5
1.1	Objectifs du PPR	5
1.2	Constitution du dossier	6
2	Rappel sur l'aléa régional	6
2.1	Sismicité régionale	6
2.2	Faïlle de Donaréo	6
2.3	Zonage sismique réglementaire national	7
3	Effets de site lithologiques	9
3.1	Contexte géologique	10
3.2	Carte géologique levée au 1/5000	11
3.3	Données géotechniques dans la basse vallée du Var	14
3.4	Mesures géophysiques	15
3.4.1	Profils de vitesse de propagation des ondes sismiques dans le sol	15
3.4.2	Mesures de f_0 , fréquence de résonance fondamentale des sites	16
3.5	Modèle 3D dans la basse vallée du Var	20
3.6	Définition du microzonage des effets de site lithologiques	21
3.6.1	Méthodologie	21
3.6.2	Résultats	22
4	Effets de site topographiques	24
4.1	Topographie de la commune	24
4.2	Méthode d'évaluation des amplifications liées au relief	24
4.3	Résultats	25
4.4	Définition du microzonage des effets de site topographiques	28
5	Conclusion	29
	Références bibliographiques	31
	Annexe 1 : Méthode H/V bruit de fond	33
	Matériel utilisé	33
	Géophone	33
	Station d'acquisition	33
	Mise en œuvre sur la commune de Saint-Laurent du Var	33
	Annexe 2 : Paramètres de la fonction SAPE	35

1 Introduction

La sismicité de la région Niçoise, bien que modérée en comparaison à d'autres zones géographiques mondiales, est néanmoins non négligeable compte tenu des séismes historiques qui se sont produits. L'essor de la démographie régionale, implique un enjeu d'autant plus important. Par ailleurs, les mouvements sismiques peuvent être très sensiblement modifiés par les conditions géologiques locales de proche surface. Ces "effets de site" sont des effets de piégeage d'ondes conduisant à des amplifications pouvant atteindre des facteurs très élevés (supérieurs à 10 dans certains cas extrêmes). Ils affectent principalement les reliefs marqués et les remplissages sédimentaires, configurations que l'on retrouve toutes deux dans la ville de Saint-Laurent-du-Var. Face aux risques naturels, l'État travaille à mettre en place, dans chaque commune, un Plan de Prévention du Risque (PPR). C'est donc un des services de l'État (la Direction Départementale des Territoires et de la Mer des Alpes-Maritimes), qui, en concertation avec la commune, élabore ces plans de prévention. Le PPR est l'outil privilégié de l'État en matière de prévention des risques. Il s'agit d'une procédure spécifique qui prend en compte les risques naturels dans l'aménagement. C'est une servitude publique qui s'impose à tous, et notamment, au Plan Local Urbanisme.

Le PPR sismique peut agir notamment sur les bâtiments neufs, les structures existantes, l'aménagement du territoire et l'intervention des secours. Les objectifs principaux sont : la protection des personnes et des biens (réglementation parasismique pour les bâtiments), la gestion de crise efficace (renforcement des bâtiments stratégiques).

Le propos de ce rapport est de présenter les études d'aléa sismique régional et local, préalables à l'établissement du PPR sismique de Saint-Laurent-du-Var qui ont été menées par le Cerema en collaboration avec le BRGM.

Saint-Laurent-du-Var est une commune des Alpes-Maritimes située en front de mer entre Nice et Cagnes-sur-Mer. La commune est limitée à l'Est par le fleuve Var et au Sud par la mer Méditerranée. Sa superficie est proche de 10 km² et sa population atteint environ 29 000 habitants.

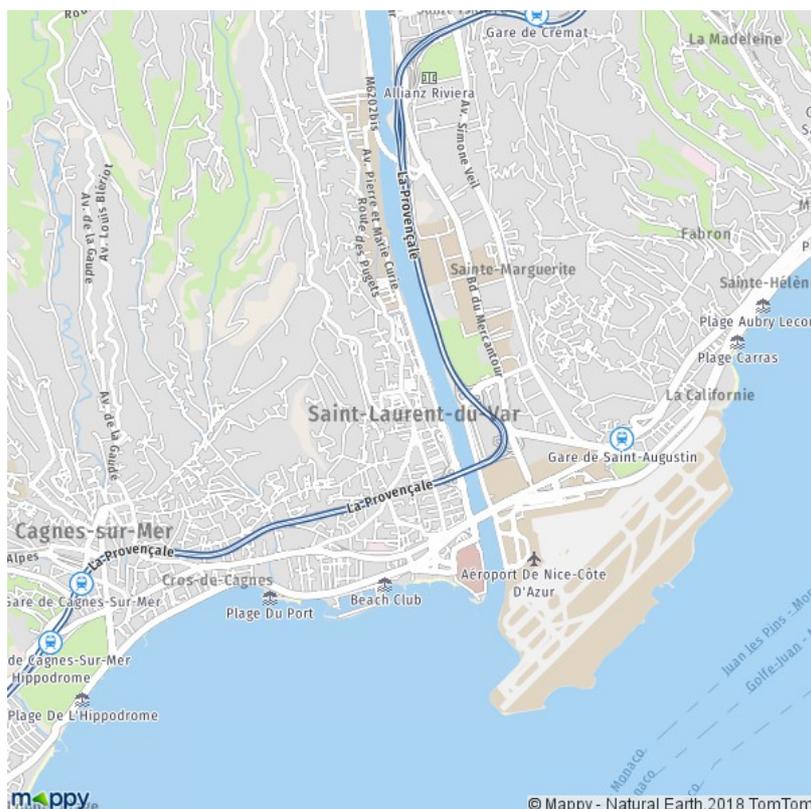


Figure 1 : Localisation de la commune de Saint-Laurent-du-Var (06).

1.1 Objectifs du PPR

Les objectifs d'un PPR sont de :

- 1) Délimiter les zones exposées directement ou indirectement au risque,
- 2) Instituer une réglementation minimum afin de garantir les mesures de prévention,
- 3) Constituer et divulguer à chacun une connaissance du risque.

1.2 Constitution du dossier

Le PPR est composé de différents éléments :

- 1) Un rapport de présentation : permettant de comprendre et d'expliquer pourquoi une zone est rendue inconstructible ou constructible sous conditions,
- 2) d'un plan de zonage : carte représentant les différentes zones d'aléas mais aussi d'enjeux d'une commune,
- 3) d'un règlement : expliquant la carte de zonage et donnant des informations réglementaires sur les modalités à appliquer suivant la zone dans laquelle se trouve le terrain à bâtir.

2 Rappel sur l'aléa régional

2.1 Sismicité régionale

Le Sud-Est de la France est régulièrement secoué par des séismes ressentis par la population, les derniers en date étant ceux de la vallée de l'Ubaye à Barcelonnette (2012 et 2014). Les épicentres des séismes sont principalement localisés dans les massifs des Alpes selon un axe Nord-Ouest – Sud-Est ainsi qu'en mer Ligure selon une direction parallèle à la côte. Des séismes historiques majeurs ont frappé la région aux XVIème, XVIIème et XIXème siècles (Figure 2). Le dernier événement majeur est les séisme Ligure du 23 février 1887 dont l'épicentre était situé au large d'Imperia (Italie). Sa magnitude a récemment été revue à la hausse et aurait pu atteindre 6,9 (Larroque et al., 2012).

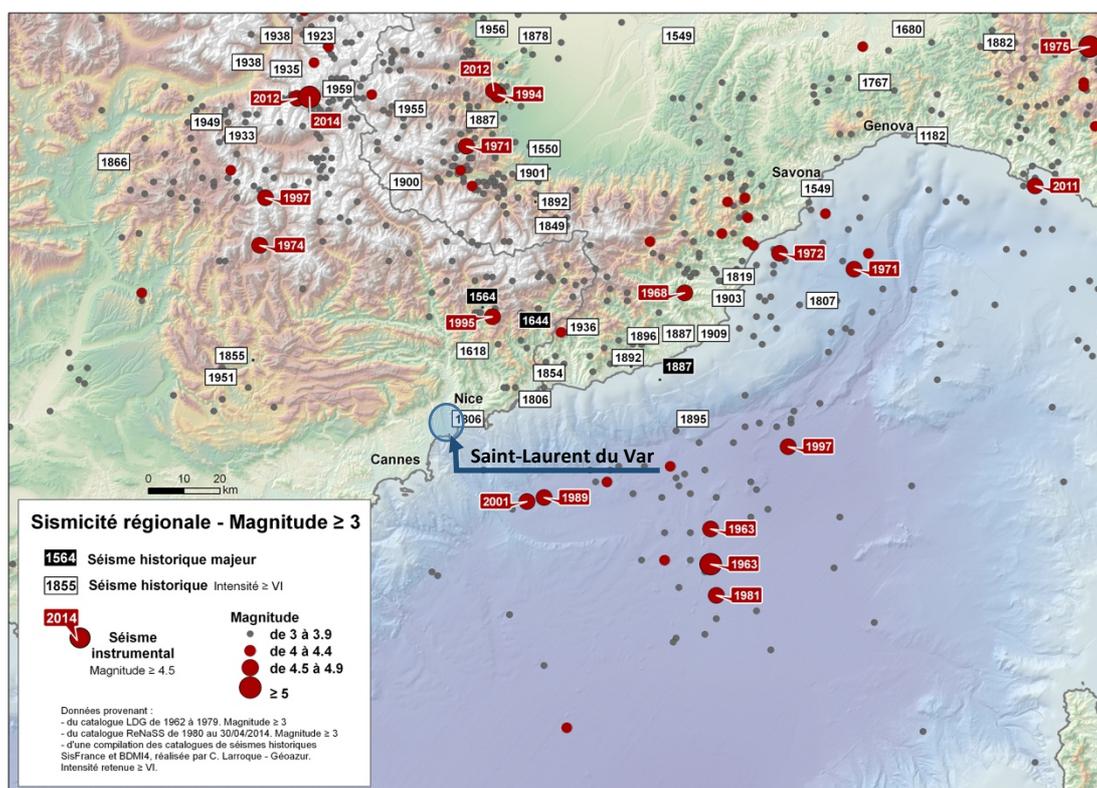


Figure 2 : Sismicité du Sud-est de la France (Séismes de magnitude supérieure à 3 jusqu'en 2014), reproduit avec la permission du laboratoire GEOAZUR.

2.2 Faille de Donaréo

Au voisinage de la commune de Saint-Laurent-du-Var, sur la rive Est de la vallée, des anomalies morphologiques remarquables dans les dépôts Plio-Quaternaires des poudingues du Var montrant une tectonique active ont été étudiées par Larroque et al. (2009). De nombreuses fractures, galets fracturés et plans striés ont été observés dans le vallon de Donaréo (Aspremont). Ces éléments attestent donc de l'existence d'une faille orientée NE-SW, qui aurait potentiellement joué un rôle dans le changement de direction du cours du Var. Cependant l'activité sismique de cette faille n'a pas pu être datée et son potentiel sismogénique n'a pu être établi. De plus, aucune sismicité historique n'a été associée à cette faille et aucune microsismicité au voisinage direct de cette structure n'a jamais été enregistrée par les réseaux sismologiques en place dans la

région. Elle est donc considérée ici comme non-sismogène et n'est pas pris en compte dans l'estimation de l'aléa sismique de la commune de Saint Laurent du Var.

2.3 Zonage sismique réglementaire national

Les normes européennes de construction parasismique Eurocode 8 (EC8), s'appuient sur un zonage sismique de type probabiliste. Ce zonage réglementaire a été validé par un décret (n°2010-1255) portant sur la délimitation des zones de sismicité du territoire français et l'arrêté du 22 octobre 2010 relatif à la classification et aux règles de construction parasismique applicables aux bâtiments de la classe dite à « risque normal ». Saint-Laurent-du-Var se situe dans une zone de sismicité moyenne (zone 4). Selon cette carte d'aléa la ville est soumise à une accélération de référence au rocher de 1.6 m.s^{-2} pour les bâtiments d'habitation courante de classe II.

Les études préalables à l'établissement du PPR sismique de la ville de Nice concluent que les analyses sismotectoniques récentes sur la région ne remettent pas en cause l'aléa régional dans la région. Ainsi et par conformité, dans le cadre de l'élaboration du PPR sismique de Saint-Laurent-du-Var, le spectre de réponse de référence (au rocher) choisi est celui du zonage national pour sol rocheux (Classe A), calé à l'accélération de référence pour Nice 1.6 m/s^2 . Cette accélération de calage est valable pour le bâti de catégorie d'importance II. Les accélérations de calage sont de 2.1 m/s^2 et 2.6 m/s^2 pour le bâti de catégorie d'importance III et IV respectivement. La description des différentes catégories de bâtiments est précisée dans le Tableau 1. Dans la suite de ce rapport, l'étude d'aléa sismique locale sera réalisée en considérant le spectre de référence pour le bâti de catégorie d'importance II.

Cat.		Définition
I		<ul style="list-style-type: none"> ● les bâtiments dans lesquels est exclue toute activité humaine nécessitant un séjour de longue durée et non visés par les autres catégories
II		<ul style="list-style-type: none"> ● les bâtiments d'habitation individuelle ; ● les établissements recevant du public des 4^e et 5^e catégories au sens des articles R. 123-2 et R. 123-19 du code de la construction et de l'habitation, à l'exception des établissements scolaires ; ● les bâtiments dont la hauteur est inférieure ou égale à 28 mètres : <ul style="list-style-type: none"> ○ les bâtiments d'habitation collective ; ○ les bâtiments à usage commercial ou de bureaux, non classés établissements recevant du public au sens de l'article R. 123-2 du code de la construction et de l'habitation, pouvant accueillir simultanément un nombre de personnes au plus égal à 300 ; ● les bâtiments destinés à l'exercice d'une activité industrielle pouvant accueillir simultanément un nombre de personnes au plus égal à 300 ; ● les bâtiments abritant les parcs de stationnement ouverts au public.
III		<ul style="list-style-type: none"> ● les établissements scolaires ; ● les établissements recevant du public des 1^{ère}, 2^e et 3^e catégories au sens des articles R. 123-2 et R. 123-19 du code de la construction et de l'habitation ; ● les bâtiments dont la hauteur dépasse 28 mètres : <ul style="list-style-type: none"> ○ bâtiments d'habitation collective ; ○ bâtiments à usage de bureaux. ● les autres bâtiments pouvant accueillir simultanément plus de 300 personnes appartenant notamment aux types suivants : <ul style="list-style-type: none"> ○ les bâtiments à usage commercial ou de bureaux, non classés établissements recevant du public au sens de l'article R. 123-2 du code de la construction et de l'habitation ; ○ les bâtiments destinés à l'exercice d'une activité industrielle ; ● les bâtiments des établissements sanitaires et sociaux, à l'exception de ceux des établissements de santé qui dispensent des soins de courte durée ou concernant des affections graves pendant leur phase aiguë en médecine, chirurgie et obstétrique et qui sont mentionnés à la catégorie d'importance IV ci-dessous. ● les bâtiments des centres de production collective d'énergie répondant au moins à l'un des trois critères suivants, quelle que soit leur capacité d'accueil : <ul style="list-style-type: none"> ○ la production électrique est supérieure au seuil de 40 MW électrique ; ○ la production thermique est supérieure au seuil de 20 MW thermique ; ● le débit d'injection dans le réseau de gaz est supérieur à 2 000 Nm³/h.
IV		<ul style="list-style-type: none"> ● les bâtiments dont la protection est primordiale pour les besoins de la sécurité civile et de la défense nationale ainsi que pour le maintien de l'ordre public et comprenant notamment : <ul style="list-style-type: none"> ○ les bâtiments abritant les moyens de secours en personnels et matériels et présentant un caractère opérationnel ; ○ les bâtiments définis par le ministre chargé de la défense, abritant le personnel et le matériel de la défense et présentant un caractère opérationnel ; ● les bâtiments contribuant au maintien des communications, et comprenant notamment ceux : <ul style="list-style-type: none"> ○ des centres principaux vitaux des réseaux de télécommunications ouverts au public ; ○ des centres de diffusion et de réception de l'information ; ○ des tours hertziennes stratégiques. ● les bâtiments et toutes leurs dépendances fonctionnelles assurant le contrôle de la circulation aérienne des aéroports classés dans les catégories A, B et C2 suivant les instructions techniques pour les aéroports civils (ITAC²) édictées par la direction générale de l'aviation civile, dénommées respectivement 4 C, 4 D et 4 E suivant l'organisation de l'aviation civile internationale (OACI²) ; ● les bâtiments des établissements de santé qui dispensent des soins de courte durée ou concernant des affections graves pendant leur phase aiguë en médecine, chirurgie et obstétrique ; ● les bâtiments de production ou de stockage d'eau potable ; ● les bâtiments des centres de distribution publique de l'énergie ; ● les bâtiments des centres météorologiques.

Tableau 1 : Catégorie d'importance de bâtiments (I à IV) en fonction des risques à la personne et de l'impact socio-économique de leur défaillance en cas de séisme.

3 Effets de site lithologiques

Les effets de sites représentent l'amplification des mouvements sismiques produite, soit par la topographie (effets de sites dits topographiques), soit par la présence de formations géologiques superficielles meubles reposant sur un substratum plus rigide (effets de sites dits lithologiques).

Le microzonage est la cartographie des effets de site locaux. Pour chaque zone à réponse sismique homogène (zonage sismique), est défini le mouvement sismique à prendre en compte pour les constructions neuves, en termes de spectre de réponse élastique en accélération à 5% d'amortissement.

Le spectre de réponse élastique (Figure 3) est une courbe représentant l'accélération maximale d'un oscillateur simple, induite par un mouvement sismique fixé de base, en fonction de la période propre et de l'amortisseur critique (fixé à 5%) de cet oscillateur. Un spectre de réponse est défini pour une zone de sismicité particulière, pour une classe de sol et pour un enjeu spécifique (type de bâtiment soumis au risque).

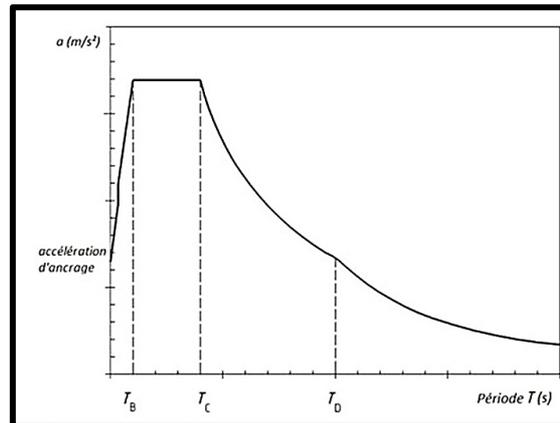


Figure 3 : Forme des spectres de réponse élastique réglementaire (5% d'amortissement) en accélération préconisée par les EC8.

Les valeurs caractéristiques du spectre de réponse élastique ainsi défini sont :

- ❖ T : période de vibration d'un oscillateur simple (système linéaire à un seul degré de liberté)
- ❖ a : amplitude spectrale ou accélération maximale de l'oscillateur simple de période propre T
- ❖ accélération d'ancrage : accélération à la période nulle
- ❖ TB : limite inférieure des périodes correspondant au palier d'accélération spectrale constante
- ❖ TC : limite supérieure des périodes correspondant au palier d'accélération spectrale constante
- ❖ TD : valeur définissant le début de la branche à déplacement constant

La norme parasismique nationale distingue cinq catégories principales de sols définies selon la valeur de Vs30 (moyenne quadratique de la vitesse de propagation des ondes de cisaillement sur les 30 premiers mètres de la colonne de sol). À chaque classe de sol (Figure 4) correspond un spectre de réponse élastique spécifique qui tient compte des effets de site lithologiques. À ces spectres forfaitaires, les PPRs substituent des spectres spécifiques tenant compte des conditions géomorphologiques locales.

Type de sol	Description	Vs30
A	Roches ou autres formations géologiques ressemblant à des roches comportant une couche superficielle de plus de 5m de matériau peu résistant	>800 (m/s)
B	Dépôts de sable très dense, de gravier ou d'argile très rigide, d'au moins plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur, caractérisés par une augmentation progressive des propriétés mécaniques en profondeur.	360-800 (m/s)
C	Dépôts profonds de sable de densité moyenne, de gravier ou d'argile moyennement raide, de plusieurs dizaines à plusieurs centaines de mètres d'épaisseur.	180-360 (m/s)
D	Dépôts de sol meuble à moyennement cohésif sans cohésion (avec ou sans certaines couches cohésives molles), ou de sol cohésif principalement mou à ferme.	<180 (m/s)
E	Profil de sol constitué d'une couche d'alluvions de surface de type C ou D dont l'épaisseur varie entre environ 5 m et 20 m et qui repose sur un matériau plus rigide dont la vitesse est > 800 m/s.	

Figure 4 : Tableau de classification des sols selon l'Eurocode 8.

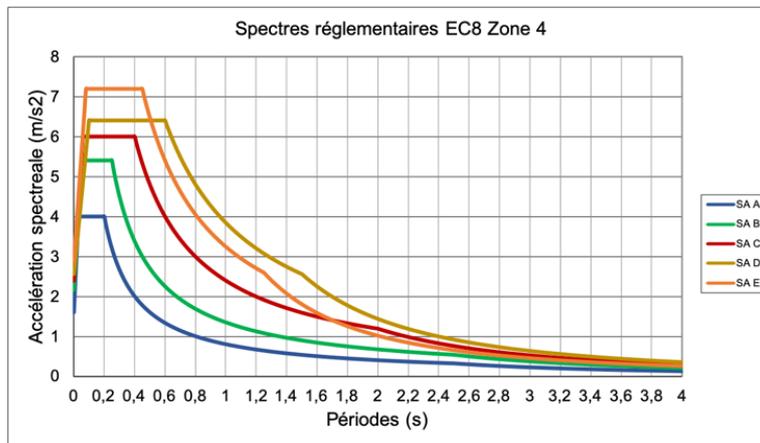


Figure 5 : Spectres de réponse élastiques réglementaires de la zone de sismicité 4.

3.1 Contexte géologique

La basse Vallée du Var est localisée dans une vallée à géologie structurale complexe (Mangan et al., 2012) (Figure 6) : Elle se situe à la charnière de plusieurs unités structurales telles que l'avant-pays provençal au Sud-Ouest, les chaînons subalpins de l'arc de Castellane au Nord-Ouest et ceux de l'arc de Nice à l'Est.

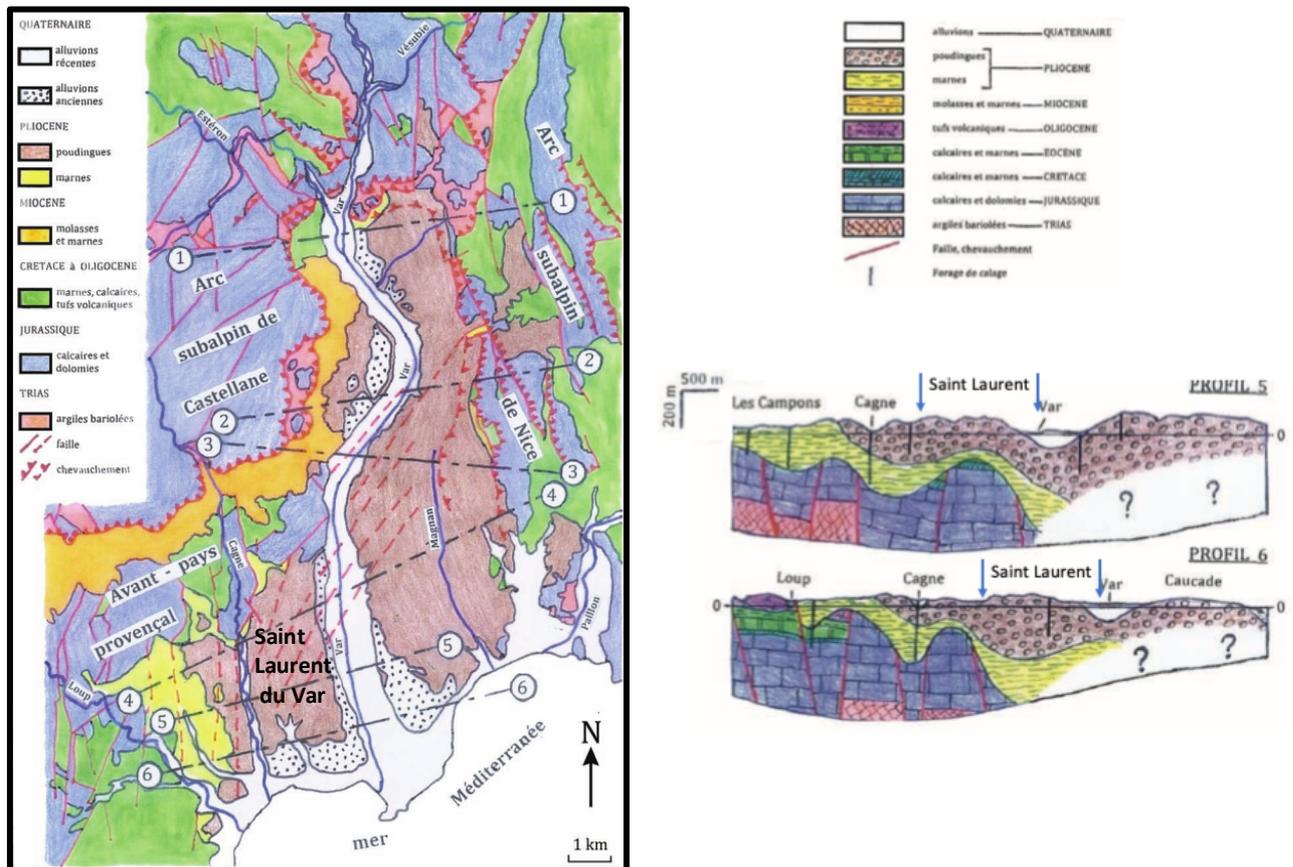


Figure 6 : Cadre structural de la basse vallée du Var (Mangan et al., 2012)

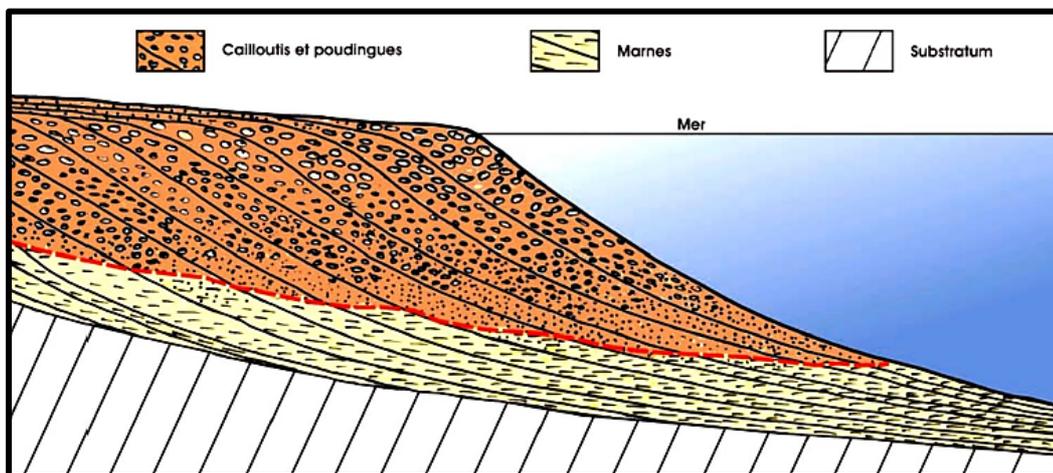


Figure 7 : Modalités de mise en place du delta du Var au Pliocène (Mangan et al., 2012)

Les formations locales, datées du Pliocène, sont constituées de poudingues (environ 200m d'épaisseur), issus de l'ancien delta du Var. S'y retrouve également les dépôts des affluents de ce delta, constitués de graviers et galets (à l'amont du fleuve) agglomérés par un ciment grossier sablo-limoneux (à l'aval), ces matériaux sont originaires de roches de l'arrière-pays (BRGM, 1993). Ces sédiments se sont déposés par progradation (dépôt successif se déposant de plus en plus loin du bord de côte) sous-marine dans les rias et canyons creusés au Messinien, et sont composés à la base de marnes parfois sableuses, surplombées par des cailloutis et poudingues (Figure 7) (Mangan et al., 2012).

En recouvrement de ces poudingues Pliocène, viennent les terrains du Quaternaire constitués d'alluvions. Selon une étude du bureau ERG Géotechnique (2006) pour la partie Ouest de la vallée, ces alluvions, correspondant à des terrasses würmiennes bien individualisées, dominant de 8 m à 13 m le niveau du fleuve. Des alluvions plus récents se trouvent également à l'affleurement. Les poudingues du Pliocène constituent ainsi le substratum sismique de la vallée du Var. Par ailleurs, sur la commune, on retrouve ces Poudingues en affleurement (Figure 8), où ils forment les plus forts reliefs de la ville.



Figure 8 : Photo d'un affleurement de Poudingues du Pliocène prise au voisinage du cimetière de Saint Laurent du Var.

3.2 Carte géologique levée au 1/5000

La carte géologique présentée ici a pour base la carte géologique au 1/50000 (feuille Grasse-Cannes BRGM) complétée des informations relevées sur le terrain pour établir une carte géologique au 1/5000. Seules les formations géologiques présentes à l'affleurement sur le territoire de la commune de Saint Laurent du Var seront décrites dans ce paragraphe.

L'Oligocène : Au Nord de la commune, affleure une formation volcanique représentée par un conglomérat andésitique. L'extension de cet affleurement (essentiellement en bord de route) est relativement limitée.

Cependant, un sondage au droit de cette zone a rencontré ce conglomérat andésitique sur environ 350m de profondeur. Ce volcanisme pourrait être relié à l'activité du volcan de Biot.

Le Pliocène : Les poudingues forment l'essentiel des collines de la commune mais peuvent aussi être observés à des altitudes plus basses. Ils sont formés par un mélange de galets et cailloutis dans une matrice argilo-sableuse, avec par endroit des intercalations de marnes sous forme de bancs ou de lentilles. Ces dépôts constituent l'ancien delta du Var et sont issus du remplissage des rias et canyons creusés durant la période messinienne (-6Ma).

Le Quaternaire : Ce sont des dépôts alluviaux qui se sont mis en place au cours des grandes périodes glaciaires. On distinguera :

- Les terrasses anciennes : Il s'agit d'alluvions fluviales (ante-wurmiennes) constituées de galets de dimensions variées englobés dans une matrice limono-sableuse pouvant présenter une teinte rougeâtre.
- Les terrasses récentes : Constituées d'alluvions fluviales wurmiennes, ces terrasses sont composées de galets et peu de matrice.
- Les cordons littoraux au sud de la commune : Ils sont représentés par des galets et sables. Ce sont des formations récentes et actuelles.
- Les alluvions de fond de vallée : présents le long du fleuve Var. Ce sont des dépôts actuels, fins avec des galets.

Il apparaît suite à l'analyse des sondages réalisés sur le territoire de la commune que certains secteurs ont fait l'objet d'un remblaiement. On peut citer pour exemple l'avenue des Plantiers située en partie en fond d'un vallon qui a été remblayé sur environ 5m au droit des sondages. On ne connaît cependant pas l'extension latérale de ce remblai.

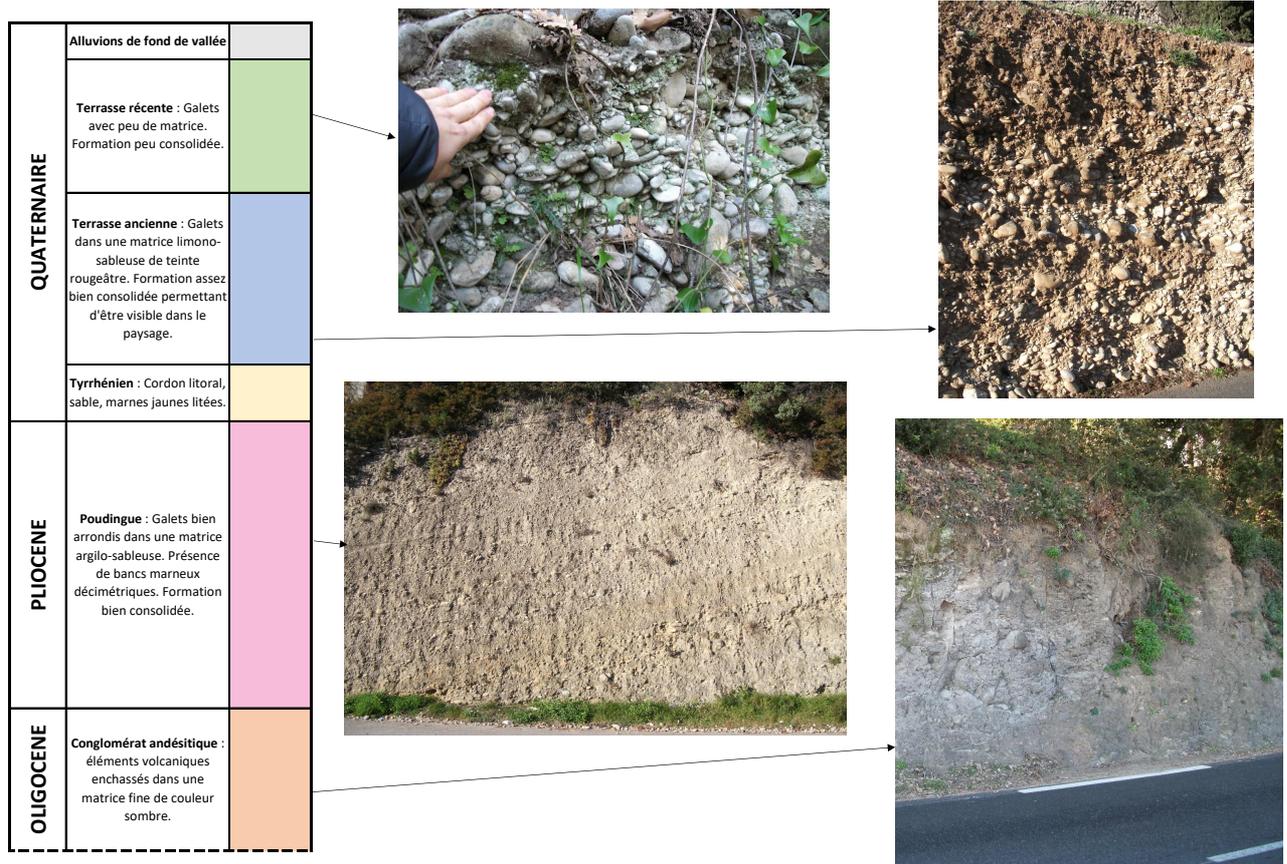


Figure 9 : Description photographique des principales formations géologiques affleurant sur la commune de Saint-Laurent du Var.

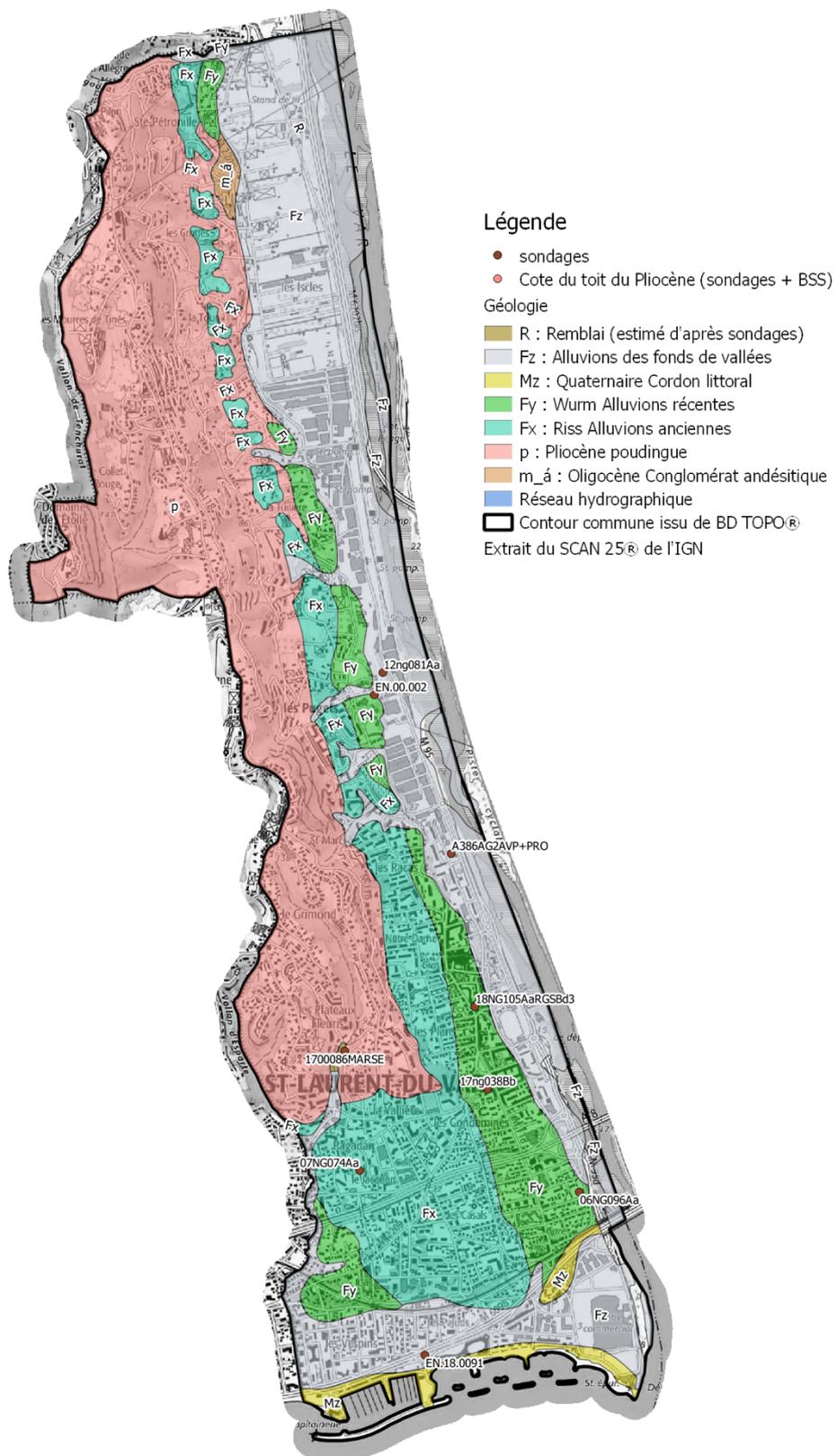


Figure 10 : Carte géologique de la commune de Saint-Laurent du Var

3.3 Données géotechniques dans la basse vallée du Var

Près de 340 sondages descriptifs provenant de la banque de données du sous-sol (infoterre.brgm.fr) et fournis par la ville de Saint-Laurent du Var ont été rassemblés pour analyser la structure lithologique des dépôts quaternaires récent de la basse vallée du Var. Ils ont permis de construire un modèle géotechnique en 9 couches sédimentaires distinctes, hors substratum rocheux, formant un log stratigraphique commun à l'ensemble des sondages selon la méthodologie déjà mise en place lors du PPRs de la ville de Nice. Ce travail d'homogénéisation des passes des sondages est indispensable pour permettre une interpolation du toit des horizons entre deux sondages consécutifs. Il est cependant délicat à réaliser et repose en grande partie sur une interprétation des descriptions faites par les sondeurs qui est sans doute relativement subjective. Cette homogénéisation se heurte également à des possibles erreurs ou imprécisions des descriptions des passes dans les sondages recueillis.

Le Tableau 2 récapitule les différents niveaux du Quaternaire récent avec la description et le code attribué à chacune des couches. L'empilement de référence des couches est une notion très importante puisque c'est lui qui va définir la pile stratigraphique du sous-sol de la basse vallée du Var. Cette pile retrace les épisodes de la géologie récente de Nice et ses environs. Excepté la couche de remblai ou revêtement bitumeux, les huit autres couches ont une origine fluviatile, c'est d'ailleurs pour cela qu'on les retrouve dans la basse vallée du Var. Elles se différencient essentiellement par leur âge et leur granulométrie. En effet il s'agit de sables, graviers, limons ou argiles.

Description des niveaux	Code	Géologie (carte géologique au 1/5000 ^{ème})	
Remblais, terre végétale, béton	1	X	Dépôts anthropiques
Sable, galets, graviers	2	Fz Fy Fy-z	Alluvions actuelles Alluvions récentes des basses terrasses Alluvions actuelles et anthropiques
Limons, argile (graveleux parfois tourbeux)	3		
Sable, graviers, galets	4		
Sable fin, sable limoneux	5		
Sable, graviers, galets	6		
Limons, argile (tourbeux)	7		
Sable, graviers, galets	8		
Éboulis	9		
Substratum	R	P2 / P1	Pliocène

Tableau 2 : Description lithologique des couches reconnues dans les données de sondage de la basse vallée du Var à Saint-Laurent.

Code	Description des niveaux	ρ (kg/m ³)	Vs (m/s)
1	Remblai, terre végétale, béton	1900	180 (+/- 60)
2	Sable, graviers, galets	1900	290 (+/- 80)
3	Limons, argile (graveleux parfois tourbeux)	1700	200 (+/- 100)
4	Sable, graviers, galets	2100	330 (+/- 80)
5	Sable fin, sable limoneux	1800	250 (+/- 60)
6	Sable, graviers, galets	2100	300 (+/- 70)
7	Limons, argile (tourbeux)	1800	220 (+/- 100)
8	Sable, graviers, galets	2000	290 (+/- 90)
9	Graves grossières	2000	300
R	Substratum	2100	1000

Tableau 3 : Caractéristiques mécaniques retenues pour les 9 couches du modèle 3D.

Les paramètres mécaniques de ces différents niveaux sédimentaires ont été repris des études préalables au PPRs de la ville de Nice. Afin de modéliser la réponse sismique des sols, il est nécessaire de connaître les

caractéristiques mécaniques des divers horizons composant le modèle. Un des paramètres essentiels est la vitesse de propagation des ondes de cisaillement dans les différentes couches. Elles sont rappelées dans le tableau ci-dessus.

3.4 Mesures géophysiques

3.4.1 Profils de vitesse de propagation des ondes sismiques dans le sol

La vitesse de propagation des ondes de cisaillement a été estimée en plusieurs points de la commune à l'aide d'essais de sismique active légère (profils MASW). Quatre mesures ont été réalisées sur la commune et au voisinage immédiat. Le premier point se situe sur le poudingue pliocène affleurant à Nice (en bordure Est de la vallée), le deuxième sur le calcaire affleurant au nord de la commune, le point n°3 sur les poudingues de la bordure ouest de la vallée du Var et le dernier sur les terrasses anciennes (Figure 11). Au point 2, le profil de vitesse obtenu est caractéristique d'un site rocheux recouvert d'une faible épaisseur de colluvions. Les points 1 et 3 permettent d'estimer une vitesse de propagation des ondes S dans le poudingue proche de 1000 m/s, ce poudingue pouvant être recouvert d'une épaisseur assez importante de matériel moins cohésif. Enfin, au point 4 nous montrons une vitesse V_s proche de 400 m/s dans les sédiments recouvrant le substratum pliocène (poudingue). À ce site, l'épaisseur des dépôts quaternaires serait de 18 mètres environ. La vitesse moyenne sur les 30 premiers mètres (V_{s30}) est alors estimée en ce point à 530 m/s environ. Par extension, une valeur approximative de 500 m/s sera considérée pour la V_{s30} sur l'ensemble des terrasses quaternaires présentes sur la commune.

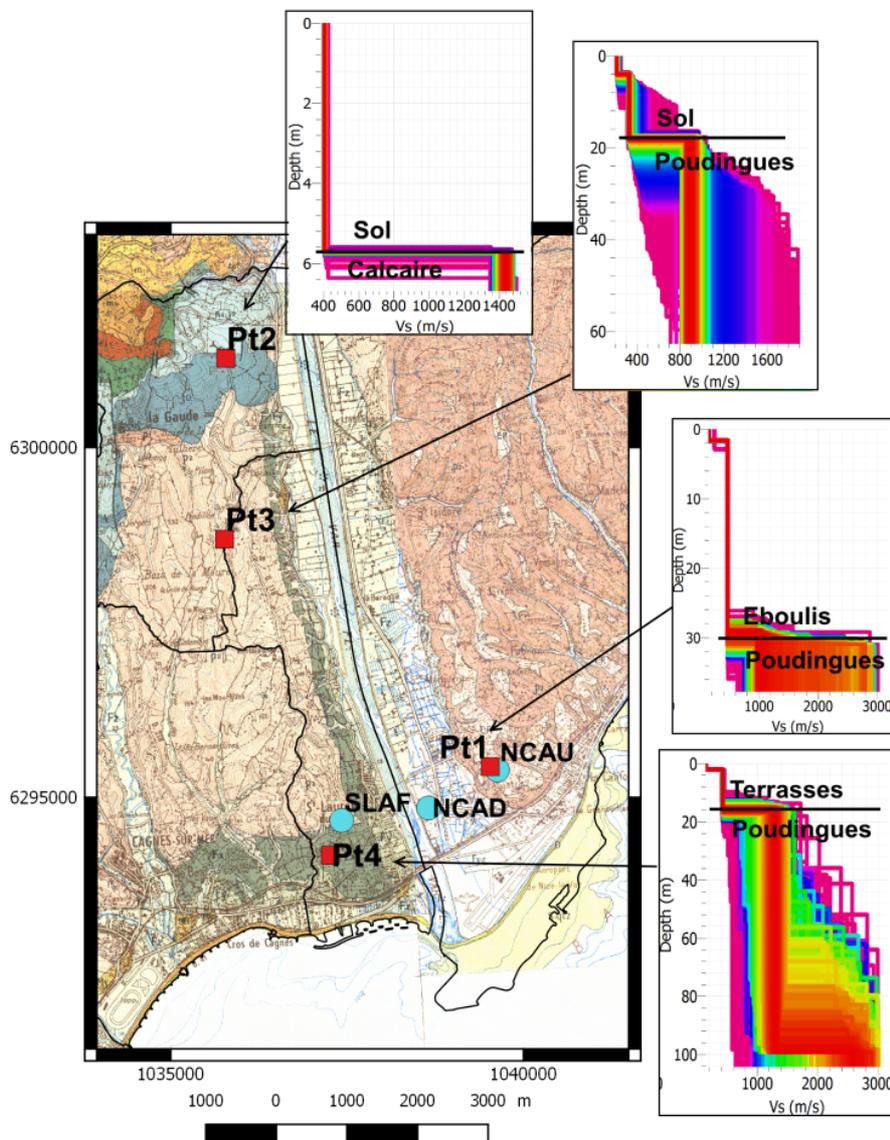


Figure 11 : Profils de vitesse V_s mesurés sur la commune de Saint-Laurent du Var. (fond de carte : géologie au 50 000ème, BRGM)

3.4.2 Mesures de f_0 , fréquence de résonance fondamentale des sites.

Pour quantifier les effets de site, la méthode expérimentale *ad hoc* consiste à enregistrer des séismes en divers points du territoire étudié dont un point de référence au rocher et de calculer des rapports spectraux site/référence. Outre les questions de représentativité de la référence, de linéarité des phénomènes sismiques, la mise en œuvre de la méthode à l'échelle d'une commune est relativement difficile, limitée aux points de mesures et nécessite un certain temps d'observation. Une autre approche, adaptée au microzonage sismique, est désormais également utilisée. Elle se base sur l'enregistrement des vibrations ambiantes (le bruit de fond sismique, cf. Annexe 1), selon les trois directions de l'espace. Une division spectrale des composantes horizontales par la composante verticale du mouvement du sol permet d'estimer, sous certaines conditions, la fréquence de résonance fondamentale liée au remplissage sédimentaire. Cette résonance est due au piégeage des ondes sismiques dans les couches superficielles lorsqu'il existe un contraste de vitesse fort entre celles-ci et le substratum qu'elles recouvrent. Ainsi, sur des sites rocheux on n'observe pas ce phénomène et aucune fréquence de résonance ne peut être déterminée.

Les mesures de bruit de fond sismique ont été effectuées avec un enregistreur sismologique autonome composé d'un capteur (vélocimètre), d'un numériseur et d'une borne GPS (Figure 12). Le capteur utilisé est un sismomètre type CMG-40T développé par Güralp Systems. Il est composé de trois géophones dont deux horizontaux et un vertical. Sa fréquence propre est de 0,2 Hertz. Le numériseur utilisé est un CMG-DM24 de la société Güralp présentant une haute qualité et une résolution de 24 bits.



Figure 12 : Dispositif de mesure du bruit de fond sismique.

Plus de 100 points de mesures ont été effectués afin d'étudier la réponse des terrasses anciennes sur la commune de Saint-Laurent-du-Var et compléter les études effectuées par ailleurs dans la basse vallée du Var (microzonage de Nice). L'ensemble des points de mesure se trouve cartographié en Annexe 1 de ce rapport.

Deux exemples de traitement sont présentés sur les Figure 13 et Figure 14. Dans le premier cas, la mesure a été effectuée sur les alluvions des Terrasses anciennes dans le quartier de la Tuillière, sur le bord ouest de la vallée du Var. La courbe H/V obtenue, présente un pic bien marqué conforme aux critères définis lors du projet européen SESAME (2004). A cet endroit, la fréquence de résonance fondamentale est proche de 9,5Hz. Le deuxième cas est une mesure effectuée sur un affleurement de poudingues d'une terrasse du Riss. Ici, la courbe H/V ne montre pas de pic entre 0,1 et 15Hz. Elle est représentative d'un site au rocher, ce qui est conforme à la géologie de surface.

H/V bruit de fond a Saint Laurent du Var au point 58 le 17/04/2019 a 12h34

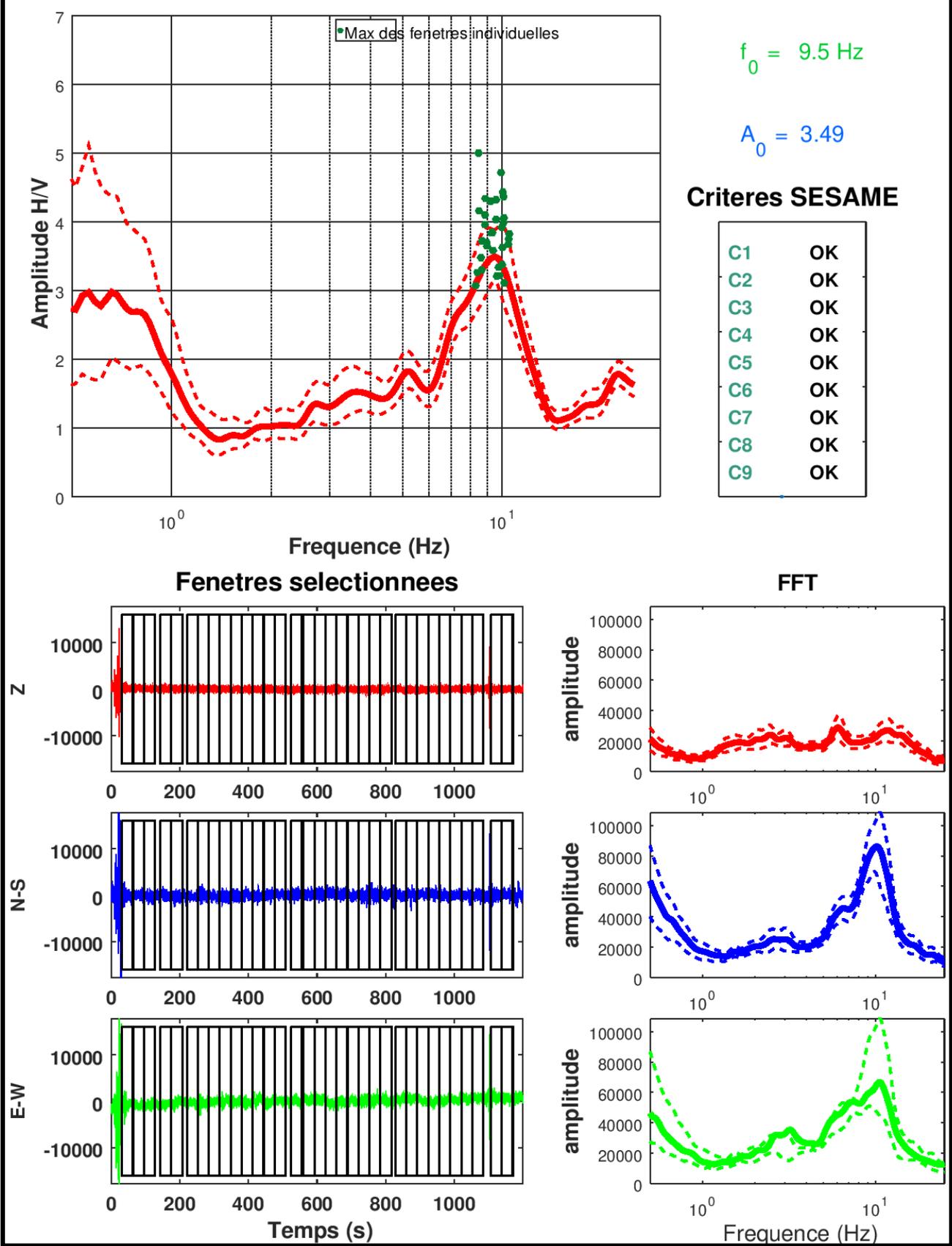


Figure 13 : Résultat de l'enregistrement du bruit de fond sismique au point n°58 situé dans le quartier de la Tuillière, bordure ouest de la vallée du Var.

H/V bruit de fond a Saint Laurent du Var au point L101 le 03/07/2019 a 07h40

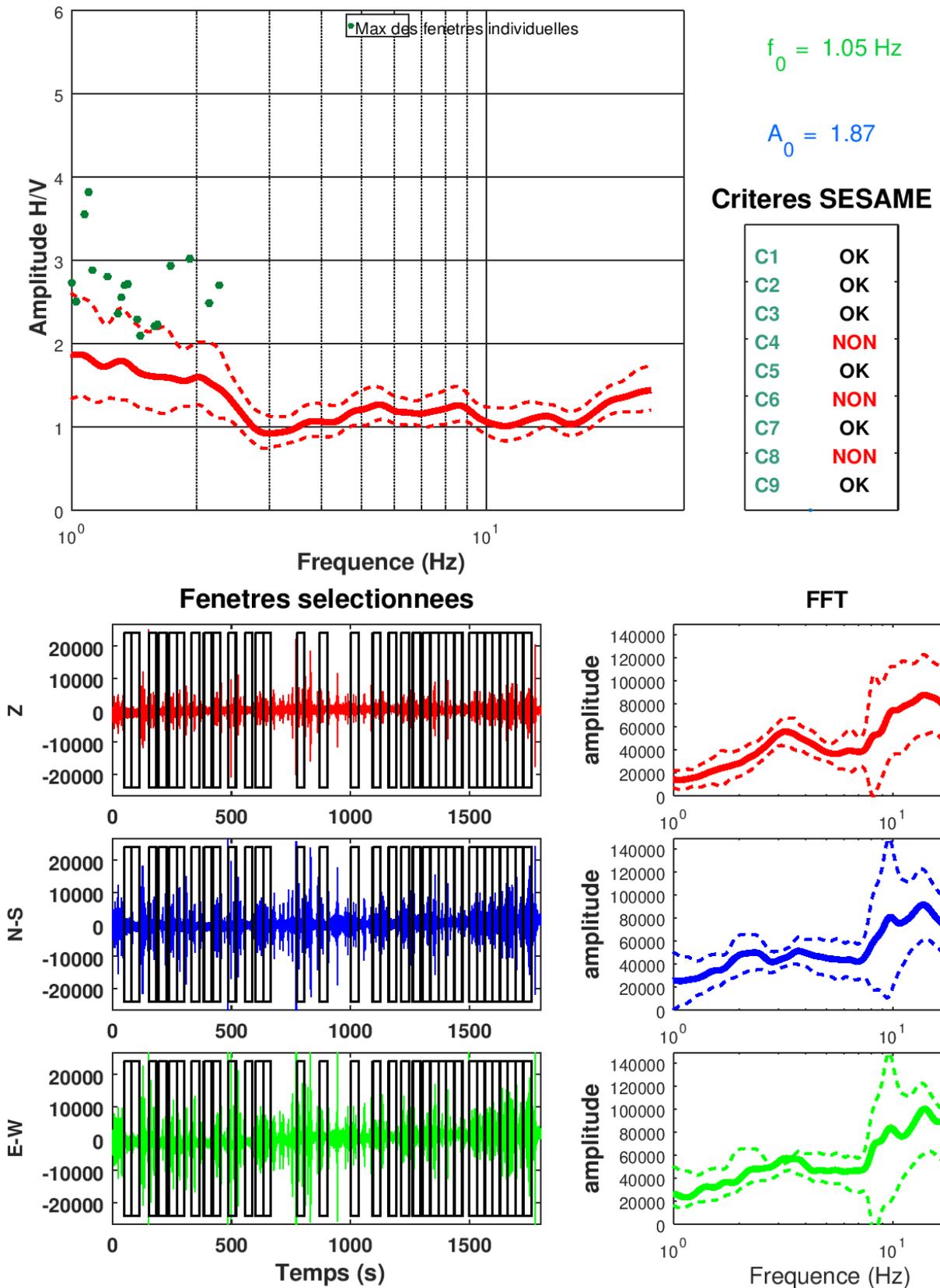


Figure 14 : Résultat de l'enregistrement du bruit de fond sismique au point n°L101 situé au Sud de la ville de Saint-Laurent du Var (Terrasse du Riss).

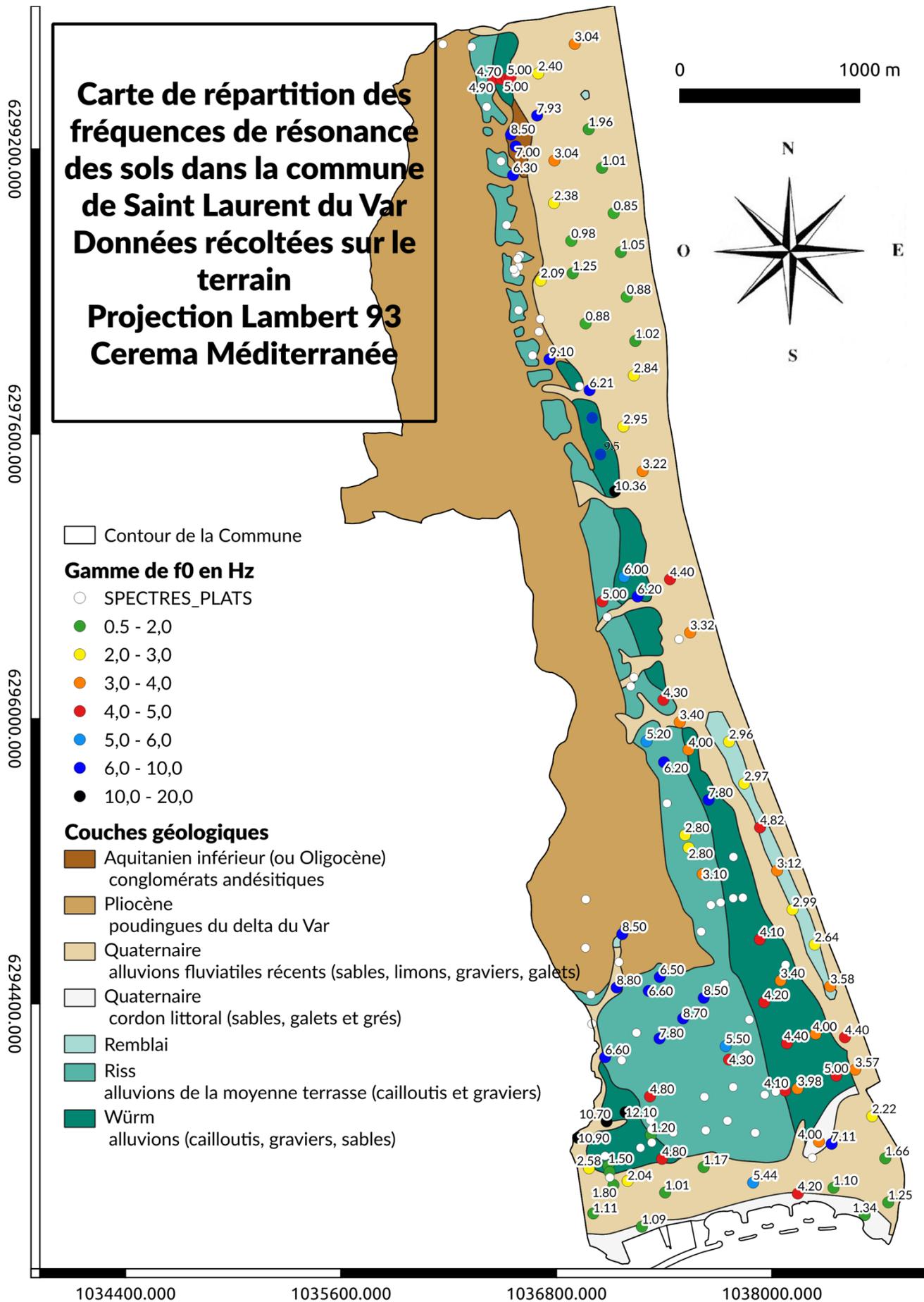


Figure 15 : Résultat de l'estimation des fréquences de résonance des sites issu de l'analyse des enregistrements de bruit de fond sismique.

3.5 Modèle 3D dans la basse vallée du Var

Un modèle 3D du sous-sol dans l'ensemble de la basse vallée du Var a été construit à partir des données géotechniques et géophysiques recueillies. L'outil informatique utilisé ici pour la réalisation du modèle est GDM (Geological Database Management) développé par le BRGM. Cet outil est basé sur un algorithme d'interpolation par krigeage intégrant des données ponctuelles telles que les points de passage des interfaces (point de localisation des limites géologiques). GDM permet de construire des modèles 3D à partir de forages, de sections ou de cartes géologiques. Pour cela il utilise une pile stratigraphique que l'utilisateur aura préalablement définie. Ce logiciel permet également d'éditer des coupes au travers du modèle. L'interpolation respecte tous les sondages, c'est à dire qu'au droit des sondages les toits des couches du modèle sont confondus avec ceux des sondages. L'interpolation est effectuée selon l'approche intitulée « voisinage par octants ». Il s'agit d'une formulation géostatistique capable d'obtenir un nombre minimum de voisins dans chaque secteur, de façon à avoir une information dans chaque direction de l'espace.

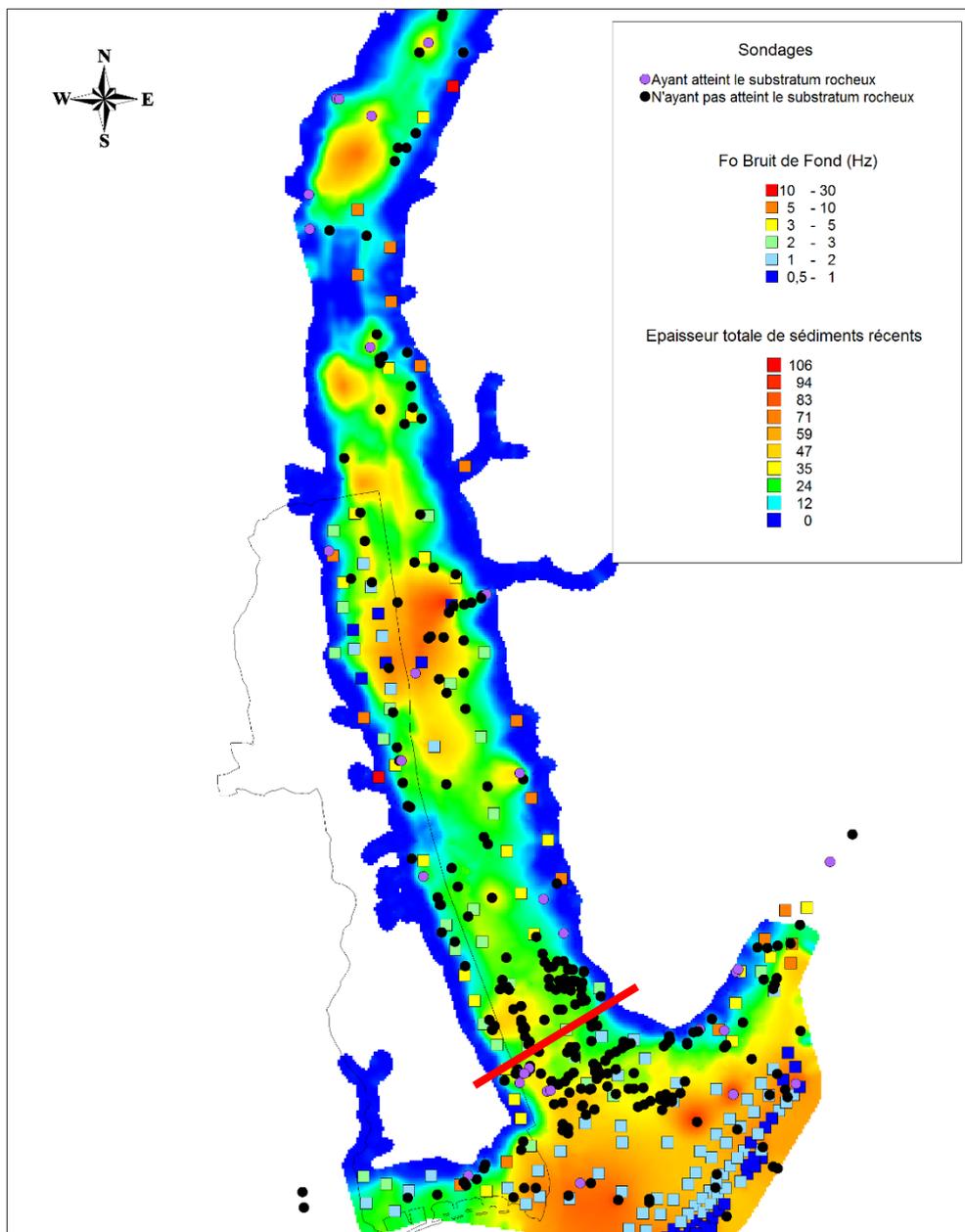


Figure 16 : Profondeur du toit du substratum rocheux dans le modèle géotechnique de la basse vallée du Var. Les points représentent les sondages géotechniques pris en compte et les carrés les données issues des mesures de bruit de fond sismique.

Dans les zones où les données géotechniques ne le permettent pas, la profondeur du substratum rocheux sous les alluvions est contrainte par les résultats de l'analyse du bruit de fond sismique. L'épaisseur sédimentaire est déduite des fréquences de résonance fondamentales en prenant en compte une vitesse de propagation des ondes de cisaillement moyenne dans les sédiments. Au final, la profondeur du substratum rocheux dans la basse vallée du Var atteint par endroit plus de 100 mètres (Figure 16). Une coupe au travers du modèle au niveau du CADAM¹ permet d'illustrer la structure des dépôts fluviaux dans la vallée (Figure 17). Dans cette

¹ CADAM : Centre Administratif des Alpes Maritimes

zone, peu de sondages atteignent le substratum. La profondeur et la forme du toit de celui-ci sont dérivés des données de bruit de fond sismique. Il en résulte l'adjonction d'une couche supplémentaire (entre les interfaces ZR : profondeur maximale atteinte par les sondages et ZR1 : toit du substratum) dont les propriétés mécaniques sont prises par défaut similaire à la dernière passe des sondages voisins.

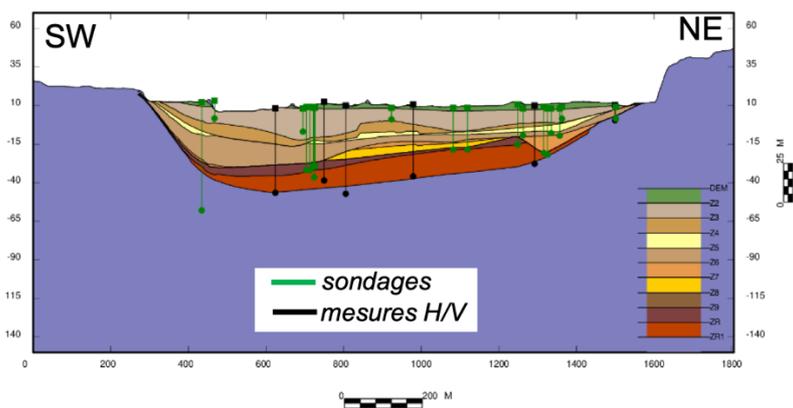


Figure 17 : Coupe SW-NE dans la basse vallée du Var montrant la succession des couches sédimentaires selon le profil rouge de la Figure 16.

3.6 Définition du microzonage des effets de site lithologiques

3.6.1 Méthodologie

Différentes méthodes peuvent être utilisées afin de calculer la réponse sismique des sites alluvionnaires. Des méthodes empiriques basées sur des enregistrements de séismes in situ, des méthodes semi-empiriques basées sur des régressions de données accélérométriques et des méthodes numériques.

L'avantage des méthodes empiriques est qu'elles sont spécifiques à un site donné et ne nécessitent pas de connaissance géotechnique avancée des sites. Néanmoins, elles s'avèrent limitées dans des pays de faible sismicité. Les méthodes numériques requièrent quant à elles une connaissance de la géologie et des paramètres géotechniques importante.

Dans le cadre des études préalables au PPRs de Nice, il a été conclu que, pour l'élaboration d'un microzonage sismique, les méthodes semi-empiriques sont un compromis intéressant entre les méthodes empiriques et les méthodes numériques. Nous allons de ce fait utiliser une méthode semi-empirique permettant d'obtenir les spectres de réponse au droit des alluvions connaissant le spectre de réponse sur un site de référence ainsi qu'un nombre limité de paramètres du site.

Le principal objectif de la thèse d'Héloïse Cadet soutenue en octobre 2007 était de déterminer une fonction correctrice permettant d'adapter un spectre au rocher dit « de référence » à un spectre sur sol sédimentaire tenant compte des effets de site (Figure 18). La méthode se base sur la vitesse moyenne des ondes de cisaillement sur les 30 premiers mètres (V_{s30}) et la fréquence fondamentale de résonance du sol (f_0) (Cadet et al., 2012).

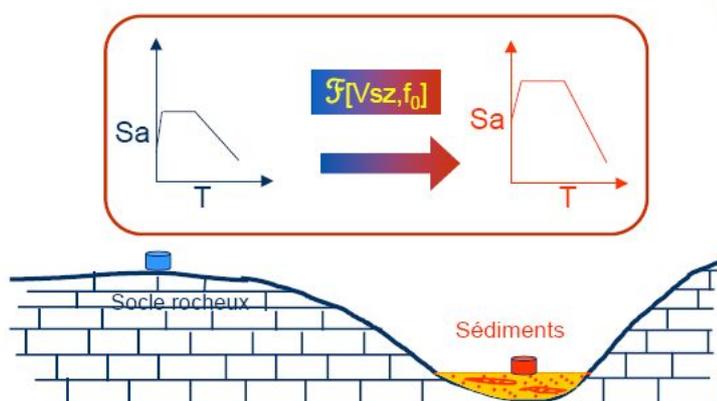


Figure 18 : illustration de la méthode SAPE permettant d'obtenir un spectre de réponse sur le sol sédimentaire à partir d'un spectre de réponse « au rocher », de V_{s30} et de f_0 .

Les fonctions correctrices (SAPE) ont été obtenues à partir de régressions sur les données issues du réseau accélérométrique Japonais Kiknet. La comparaison entre les spectres réglementaires EC8, ceux issus de cette méthode et ceux dérivés des données empiriques montre que les spectres issus de la méthode SAPE sont plus proches des observations que ne le sont les spectres EC8.

Les fonctions correctrices sont obtenues selon l'équation suivante :

$$SAPE(x_{ref}, f_{ad}) = \left(\frac{x_{ref}(f_{ad})}{x} \right)^{\alpha(f_{ad})}$$

où x_{ref} et α dépendent de f_{ad} (ensemble de 64 fréquences adimensionnelles ($f_{ad} = f/f_0$)) et x correspond au V_{s30} . Le tableau des valeurs de ces paramètres est consultable dans l'Annexe 2 de ce document.

Cette méthode donne des résultats qui a priori ne tiennent pas compte de la géométrie du sous-sol du site. Or dans la littérature, plusieurs auteurs ont calculé des facteurs d'aggravation entre des estimations de l'effet de site 1D par rapport à une estimation 2D ou 3D. Makra et al. (2012, 2016) indique pour un bassin de 3 km de large et de 150 m de profondeur que les facteurs d'aggravations sont entre 2 et 3 entre 0.3 et 10 Hz et peuvent être considérés en premier ordre uniforme le long du bassin. Quant à Kumar and Narayan (2008), ils indiquent pour un bassin de 2,8 km de large sur 120 m de profondeur des facteurs d'aggravation entre 1.5 et 1.75. La commune de Saint-Laurent-du-Var repose sur une géologie complexe, en partie sur les sédiments quaternaires anciens ou récents de la vallée du Var. Des effets 2D/3D pourraient donc exister. Néanmoins, la méthode SAPE provient de régression sur les données accélérométriques enregistrées sur plus de 600 sites au Japon. Ces sites sont situés sur des configurations géologiques diverses, mélangeant des sites ou des effets 2D ou 3D peuvent avoir lieu. Par ailleurs, les spectres en surface issus de cette méthode ont une amplitude plus élevée que ceux de la réglementation nationale. En considérant l'ensemble de ces remarques, on peut partir de l'hypothèse que les spectres définis prennent en compte, au moins en partie, la géométrie 3D des vallées sédimentaires. Ainsi, il ne paraît pas nécessaire de prendre en compte des facteurs d'aggravations supplémentaires.

3.6.2 Résultats

Dans la basse vallée du Var, les fréquences de résonance et les V_{s30} associées sont définies à partir du modèle géotechnique sur une grille régulière ayant un pas de 10 mètres. Ailleurs, à partir de l'estimation de la fréquence de résonance des sites mesurés à l'aide des enregistrements des vibrations ambiantes et des estimations de la vitesse de propagation des ondes S, nous avons appliqué la méthode SAPE à Saint-Laurent-du-Var. Nous avons ainsi obtenu un spectre de réponse élastique en surface en chacun des points considérés.

A l'aide d'un processus similaire à celui utilisé pour le microzonage de Nice, nous avons regroupé les points où les spectres présentaient une forme proche l'un de l'autre et défini, pour chaque zone ainsi créée, des formes de spectre de réponse dont la formulation analytique est la même que ceux des spectres réglementaires EC8 mais dont les caractéristiques (TB, TC, TD et S) sont spécifiques aux résultats de nos simulations.

Finalement, nous avons défini à Saint-Laurent du Var un microzonage en 4 zones à effet de site lithologique. Les trois premières zones concernent les alluvions de la basse vallée du Var tandis que la dernière concerne les terrasses anciennes bordant la vallée. Le Tableau 4 synthétise les paramètres des spectres spécifiques définis, pour les quatre zones distinctes de la commune.

En comparaison des spectres EC8 définis dans l'annexe française, les spectres spécifiques « type EC8 » ont des facteurs S (facteur d'amplification du site) et donc des plateaux plus élevés. Par contre au-delà de 0.5 secondes les spectres spécifiques ont des amplitudes équivalentes à celle des spectres EC8.

	TB	TC	TD	R	S
EC8-A	0.03	0.20	2.5	2.5	1
Type 1	0.05	0.23	1.79	2.5	1.71
Type 2	0.08	0.33	0.8	2.5	2.25
Type 3	0.08	0.39	1.44	2.5	2.06
Type 4	0.05	0.25	1.49	2.5	1.99

Tableau 4 : Paramètres des spectres spécifiques de type EC8 tenant compte des effets de site lithologiques à Saint-Laurent-du-Var.

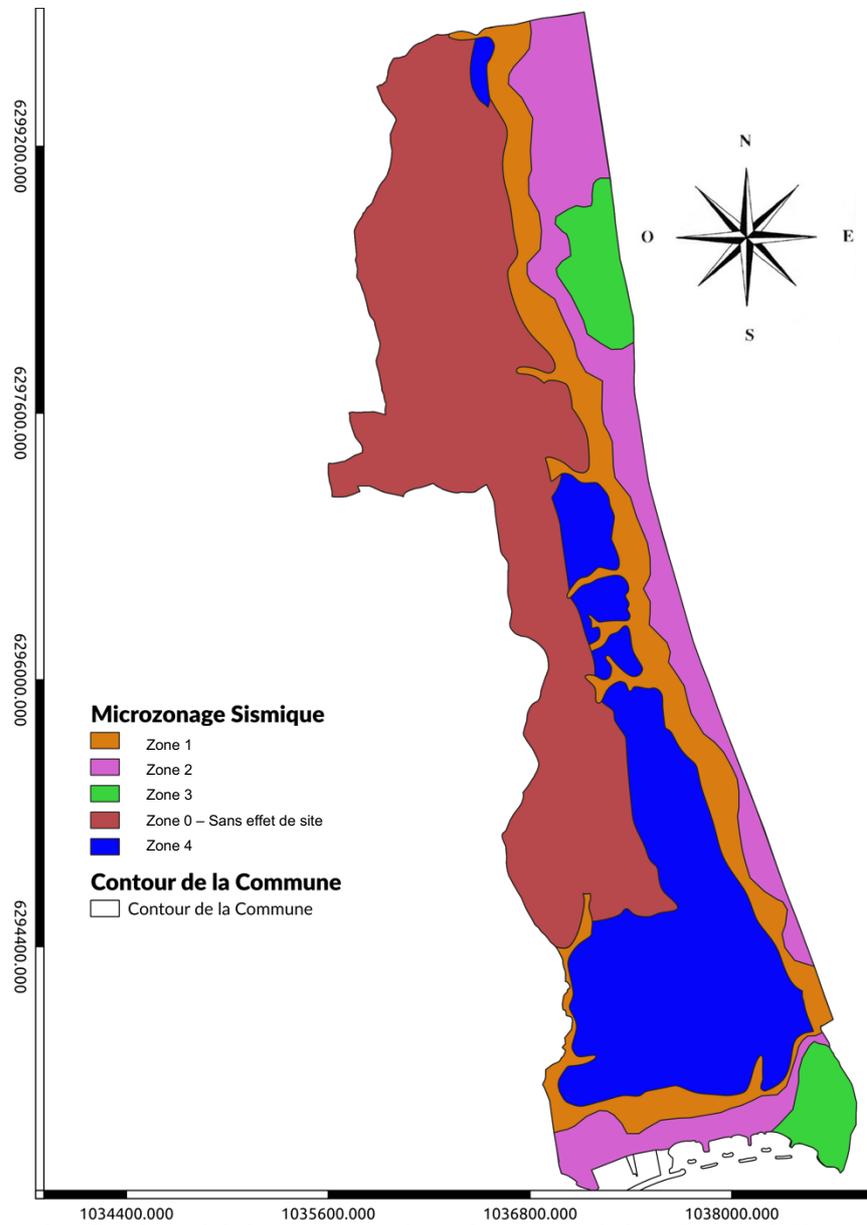


Figure 19 : Microzonage des effets de site lithologiques proposé pour la commune de Saint-Laurent du Var.

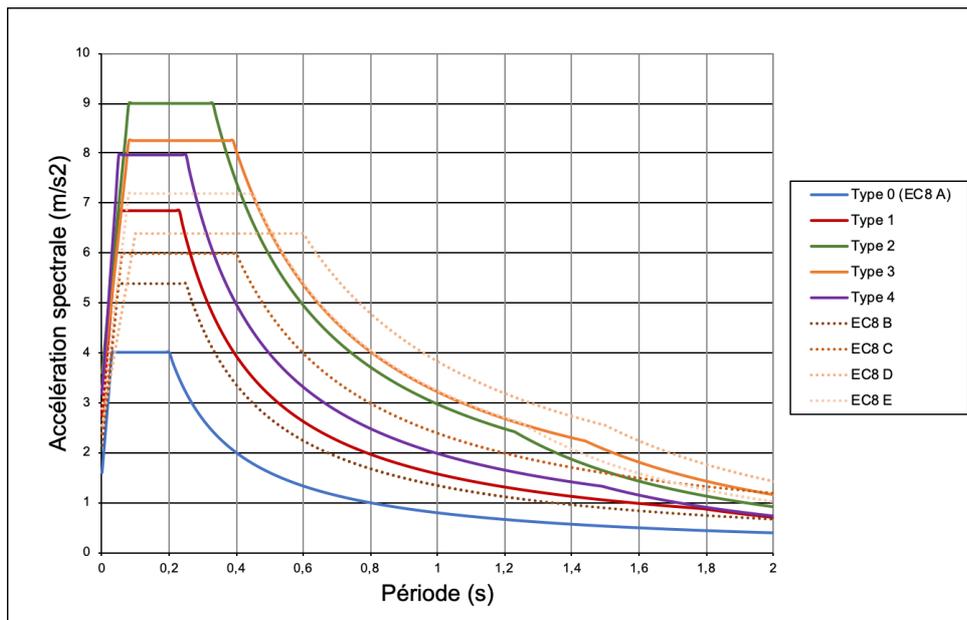


Figure 20 : Comparaison des spectres de réponse élastique (5% d'amortissement) définis pour Saint-Laurent du Var avec ceux de la réglementation nationale.

4 Effets de site topographiques

Les ondes sismiques subissent généralement une amplification par le relief pour des fréquences supérieures à 1 Hz (Boore, 1973). Nous allons appliquer la méthode d'estimation des effets de sites topographiques dite FSC (Frequency-Scaled Curvature), développée par Maufroy et al. (2012, 2015, 2018). Cette méthode se base sur l'utilisation de la courbure du relief pour quantifier l'amplification des ondes sismiques par la topographie. La courbure est lissée sur une longueur caractéristique qui dépend de la longueur d'onde du signal considéré. La méthode FSC utilise uniquement un modèle numérique de terrain et la vitesse de propagation des ondes de cisaillement dans le milieu considéré. C'est une méthode rapide et plus simple à appliquer que les méthodes expérimentales qui nécessitent des campagnes de mesures sismologiques longues en de nombreux sites de la zone d'étude dont un site de référence. La méthode est aussi plus simple à mettre en œuvre que les études numériques qui simulent la propagation d'ondes dans le sous-sol et nécessitent une connaissance très précise du milieu de propagation et des outils de simulations performants. La faible quantité de données nécessaires à l'application de cette méthode la rend facile à utiliser pour des études de type PPRS.

4.1 Topographie de la commune

La hauteur topographique maximale sur la ville de Saint-Laurent-du-Var atteint environ 220 m d'altitude (Figure 21). La commune partant du niveau de la mer, le dénivelé maximal est donc de 220 m. Ce relief est entaillé par quelques vallons secondaires faisant partie pour l'essentiel du bassin versant du fleuve Var. L'ensemble forme des reliefs peu élevés mais dont la pente peut localement être importante.

Les reliefs les plus marqués sont formés par les poudingues Pliocène qui peuvent être entaillés par des thalwegs orientés principalement ouest-est (nord-sud au Sud de la commune). Se retrouvent ensuite en contrebas les terrasses alluviales qui laissent place à un relief très doux voire plan constitué par les fonds de vallées et le littoral. Les versants de la vallée du Var sont découpés par des thalwegs parfois profonds.

4.2 Méthode d'évaluation des amplifications liées au relief

La méthode d'estimation des effets de sites topographiques FSC est détaillée dans l'article de Maufroy et al. (2015). Elle se base sur une estimation de la courbure de la surface topographique et sur la fréquence des ondes sismiques s'y propageant. Celle-ci est prise en compte par l'intermédiaire d'un lissage approprié de la courbure.

L'estimation de la courbure topographique est effectuée à partir d'un modèle numérique de terrain. À partir d'une grille cartésienne uniforme de pas h contenant les valeurs d'élévation $Z(x,y)$, on construit la matrice d'élévation E_{ij} avec i l'indice représentant les abscisses x et j les ordonnées y (Zevenbergen et Thorne, 1987). La matrice de courbure, C , contient les dérivées secondes de chaque terme de la matrice E :

$$C_{i,j} = E''_{i,j} \simeq -2(\delta + \varepsilon) \times 100$$

où δ et ε sont des valeurs approchées des dérivées secondes de E dans les directions x et y :

$$\delta = \frac{1}{h^2} \times \left[\frac{E(x_{i-1}, y_i) + E(x_{i+1}, y_i)}{2} - E(x_i, y_i) \right] \simeq \frac{\partial^2 E}{\partial x^2}$$

$$\varepsilon = \frac{1}{h^2} \times \left[\frac{E(x_i, y_{i-1}) + E(x_i, y_{i+1})}{2} - E(x_i, y_i) \right] \simeq \frac{\partial^2 E}{\partial y^2}$$

Les effets d'amplification topographique pour une fréquence d'onde sismique donnée sont contrôlés par les formes topographiques ayant une dimension comparable à la longueur d'onde associée. La longueur d'onde λ_s (en m) est définie par $\lambda_s = V_s/f$ où V_s est la vitesse des ondes de cisaillement dans le milieu (en m/s) et f est la fréquence du signal incident (en Hz). La meilleure corrélation entre la courbure de la topographie et l'amplification du mouvement du sol en fonction de la fréquence est obtenue en appliquant deux fois à la courbure un opérateur de lissage, selon la longueur caractéristique L_s , avec $L_s = \lambda_s/2$. Le calcul de la courbure lissée C_s correspond à une double convolution de la courbure C avec une matrice de dimensions $n \times n$ contenant uniquement des valeurs unitaires. $n \times h$ est l'extension spatiale de la fenêtre de lissage et n est donné par la relation $L_s = 2 \times n \times h$. n doit être un entier impair supérieur ou égal à 3 car c'est une fenêtre de lissage centrée sur une valeur de $C_{i,j}$:

$$C_{s,i,j} = \frac{1}{n^4} \times \left[C * \begin{pmatrix} 1 & \dots & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \dots & 1 \end{pmatrix}_n * \begin{pmatrix} 1 & \dots & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \dots & 1 \end{pmatrix}_n \right]$$

Le contenu fréquentiel des ondes de cisaillement est balayé en faisant varier la taille de la fenêtre de lissage n suivant la relation :

$$f = \frac{V_s}{4 \times n \times h}$$

Finalement la corrélation entre l'amplification topographique et la courbure lissée est calculée via la relation :

$$MAF(f) = \alpha \times Cs(Ls) + \beta$$

avec $\alpha = 0,0008$ et $\beta = 1$.

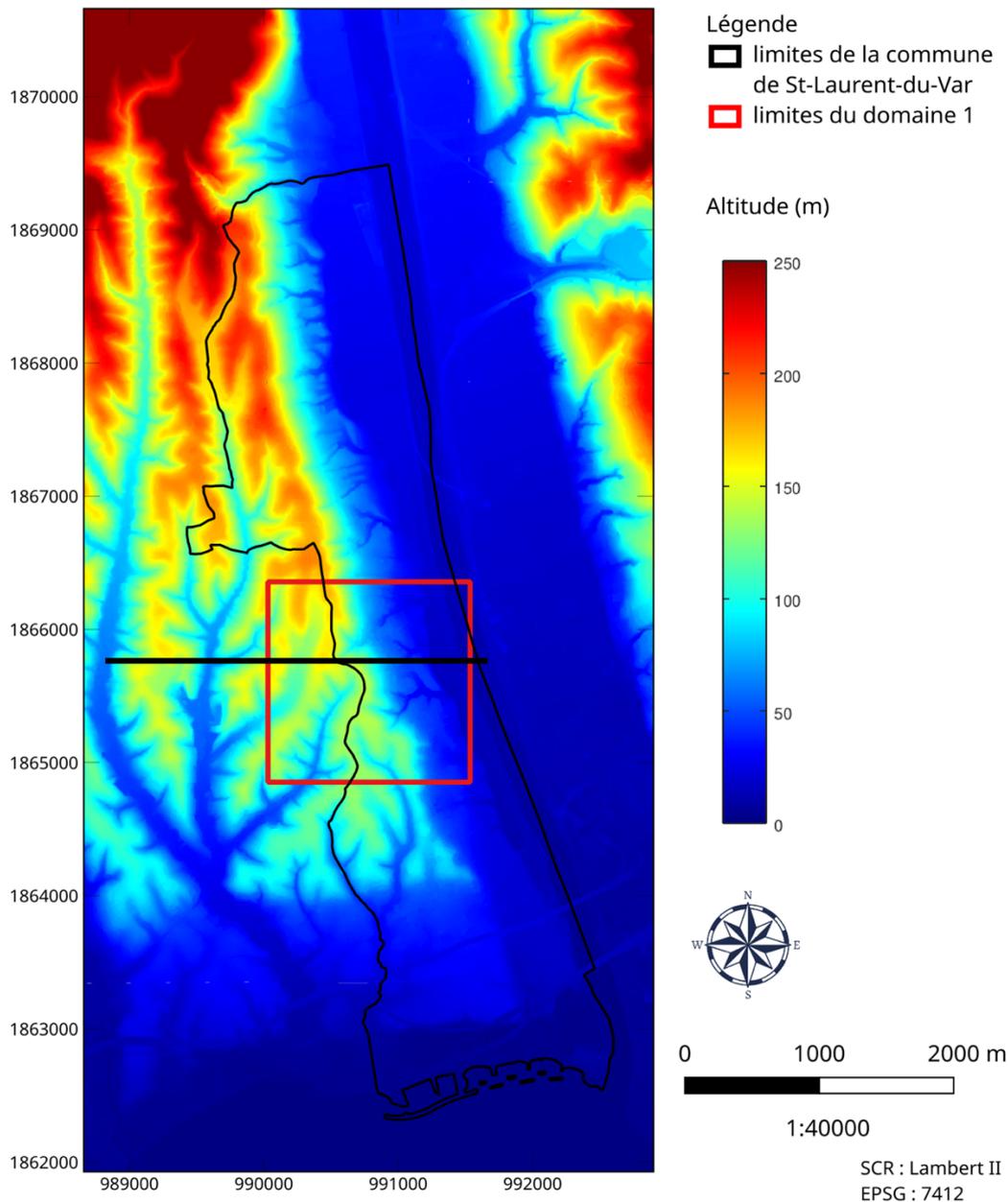


Figure 21 : Carte topographique de la commune de Saint-Laurent-du-Var.

4.3 Résultats

A Saint-Laurent-du-Var, la géologie des reliefs est principalement composée de poudingues du Pliocène, avec une couche de marnes d'épaisseur variable à leur base (Mangan et al., 2012). Dans ces formations, la vitesse moyenne des ondes sismiques S est estimée valoir $V_s = 1200\text{m/s}$. Cette vitesse a été utilisée pour calculer la longueur d'onde de toutes nos estimations d'effet d'amplification topographiques. Nous avons appliqué la méthode FSC à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT) au pas de 2m.

Une illustration est présentée dans la figure suivante sur une partie du modèle numérique de terrain de Saint-Laurent-du-Var, de dimensions 1500×1500 mètres (domaine 1, encadré rouge de la figure Figure 21). Les résultats sont présentés dans la Figure 22. La topographie de la zone d'étude est présentée sur les figures A et B. Le facteur d'amplification médian obtenu pour des fréquences de 10 Hz, 4 Hz, 2 Hz et 1 Hz est présenté respectivement sur les figures C, D, E et F. Nous pouvons constater que plus la fréquence est basse, plus l'amplification du mouvement sismique se produit sur des reliefs de grande amplitude. Les zones où il y a le plus d'amplification sont les pentes et les crêtes. Les zones où il y a le moins d'amplification sont les vallées. Les zones d'amplification sont plus resserrées lorsque la fréquence est élevée mais la valeur de ces

amplifications sont plus importantes. Par exemple, pour une fréquence de 10 Hz, le facteur d'amplification maximum est de 1,9377 et le minimum est de 0,222 alors que pour la fréquence de 2 Hz le maximum est de 1,5698 et le minimum de 0,47782. Les zones d'amplification sont donc plus larges pour les basses fréquences mais leur niveau d'amplification est moins élevé.

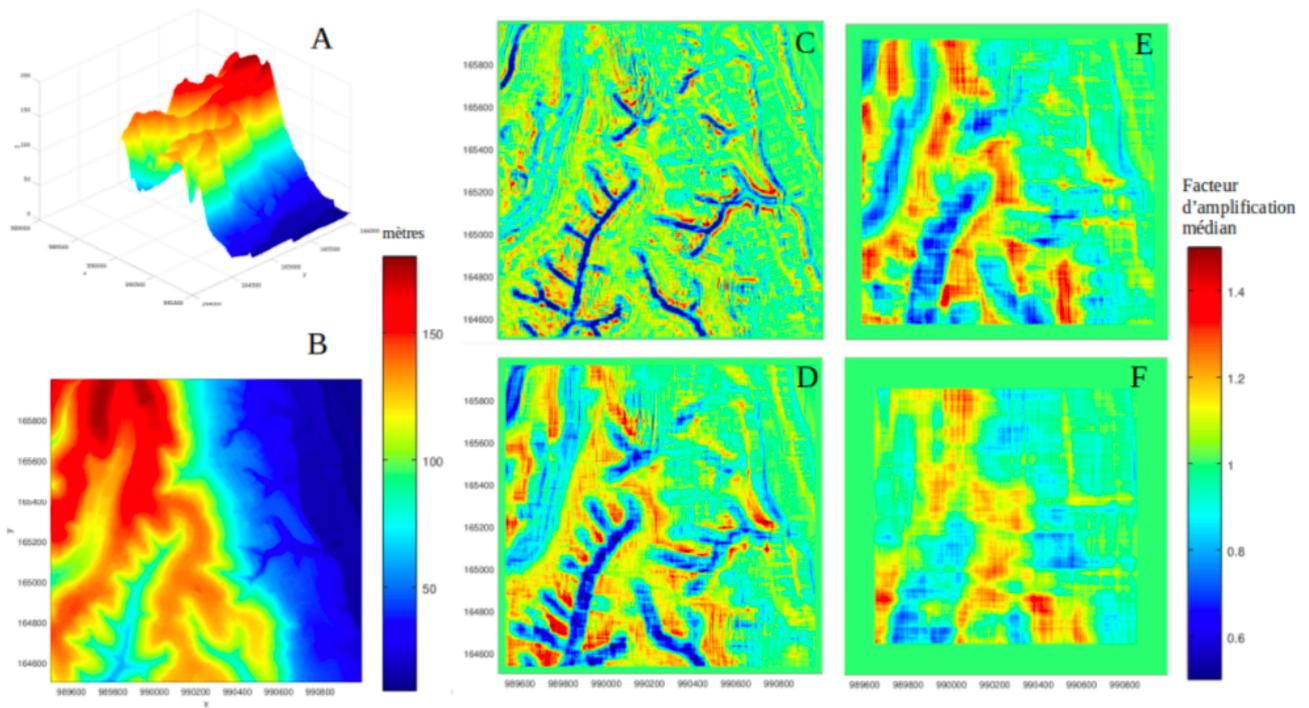


Figure 22 : Exemple de calcul de l'effet de site topographique sur une zone délimitée de Saint-Laurent-du-Var pour une vitesse de propagation des ondes S de 1200 m/s. A : topographie 3D du domaine considéré, B : carte topographique en plan, C : Amplification médiane pour une fréquence de 10 Hz (n = 15), D : Amplification médiane pour une fréquence de 4 Hz (n = 37), E : Amplification médiane pour une fréquence de 2 Hz (n = 75), F : Amplification médiane pour une fréquence de 1 Hz (n = 149).

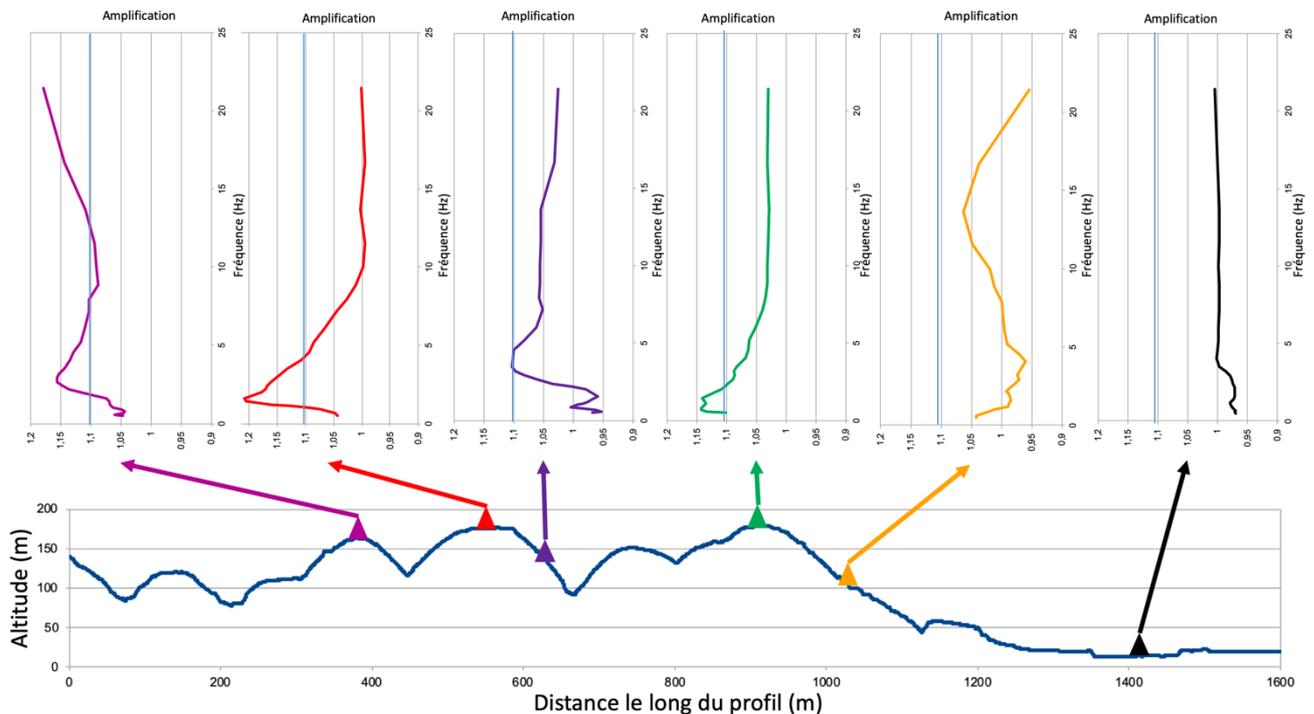


Figure 23 : Amplification topographique le long d'un profil Est-Ouest au travers de la commune de Saint-Laurent-du-Var.

Les amplifications calculées en différents points d'un profil est-ouest au travers de la commune (en trait noir sur la Figure 21) sont présentées sur la Figure 23. Les courbes représentent l'amplification du mouvement sismique en fonction de la fréquence de l'onde. Ces amplifications sont les plus fortes aux sommets des reliefs. La valeur maximale d'amplification est atteinte sur le deuxième point haut (triangle rouge). À ce point le mouvement sismique est plus élevé de 21% par rapport au mouvement de référence pour une fréquence de 1,58 Hz. Si on

considère que l'amplification n'est significative qu'à partir de 10%, seuls les sites au sommet des reliefs seraient concernés par une éventuelle augmentation du mouvement du sol en cas de séisme. Cette amplification se fait de surcroît pour des fréquences inférieures à 5 Hz.

Une synthèse des amplifications aux différentes fréquences testée (0,5 ; 1 ; 2 ; 4 ; 10 Hz) est présentée dans la Figure 24. On observe sur cette carte, des zones d'amplification sur les crêtes des reliefs et les bords de la vallée. Les zones amplifiées dans la vallée correspondent à des remblais artificiels, liés au réseau routier notamment. Ces artefacts ne sont donc pas à prendre en compte. Nous pouvons remarquer que, globalement, les zones pour lesquelles l'amplification dépasse 20% sont assez petites.

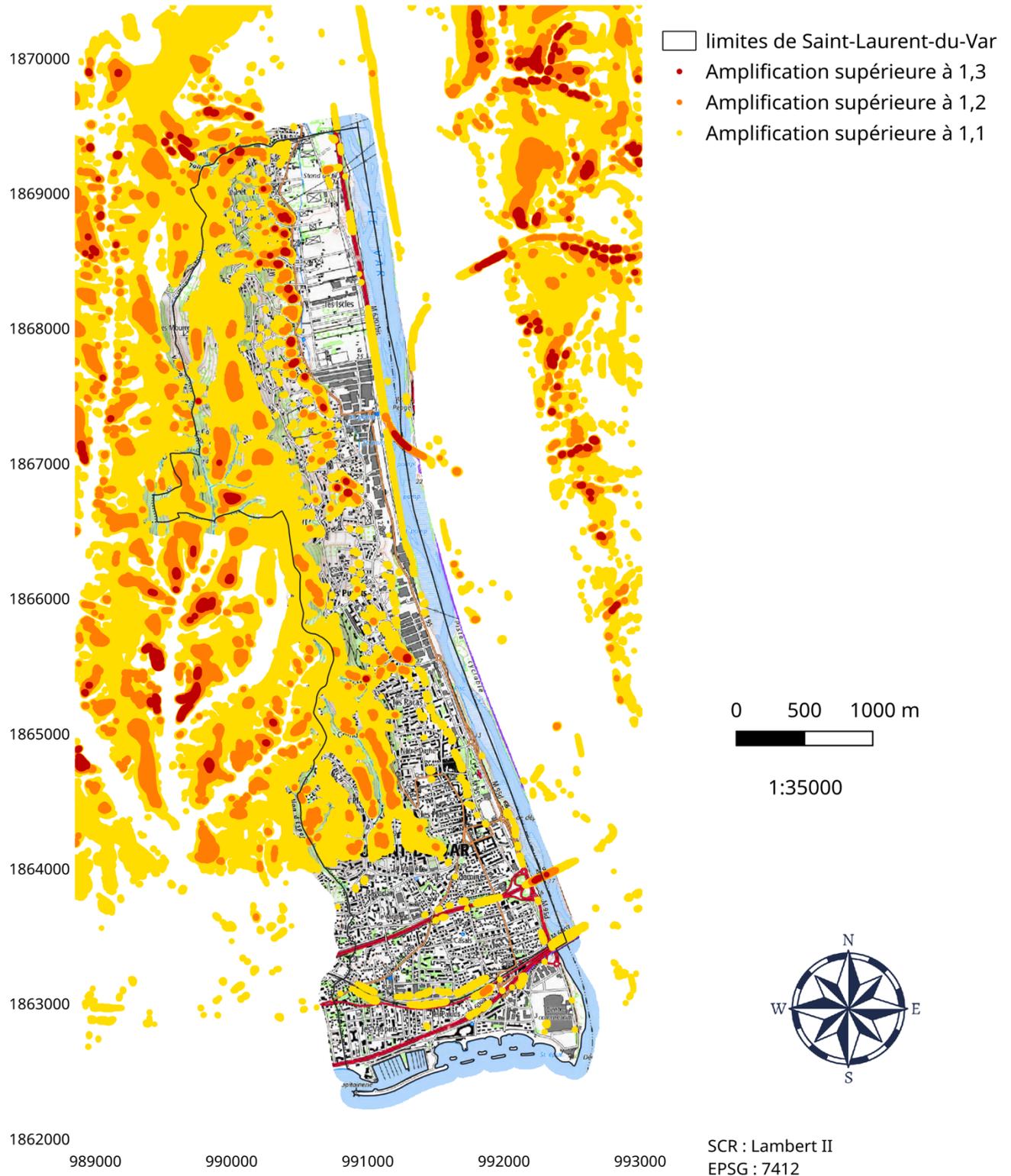


Figure 24 : Synthèse des zones d'amplification pour les fréquences (0,5 ; 1 ; 2 ; 4 ; 10 Hz), vitesse V_s considérée égale à 1200 m/s.

4.4 Définition du microzonage des effets de site topographiques

Pour le PPRs de Nice, seules les zones où l'amplification topographique était susceptible d'atteindre 40% ont été prises en compte. Cette amplification a été appliquée à l'ensemble du spectre de réponse élastique, quelle que soit la période considérée, en accord avec la réglementation nationale. En cohérence et à partir des résultats obtenus par la méthode FSC, nous avons considéré les zones de la commune de Saint Laurent du Var pour lesquelles l'amplification topographique dépassait 1,2. Seules les zones dont la surface était supérieure à 5000 m² ont été conservées. Au vu des incertitudes de la méthode sur le niveau d'amplification, il est proposé de considérer dans ces zones une amplification de 1,4 sur le spectre de réponse élastique, pour toutes les périodes.

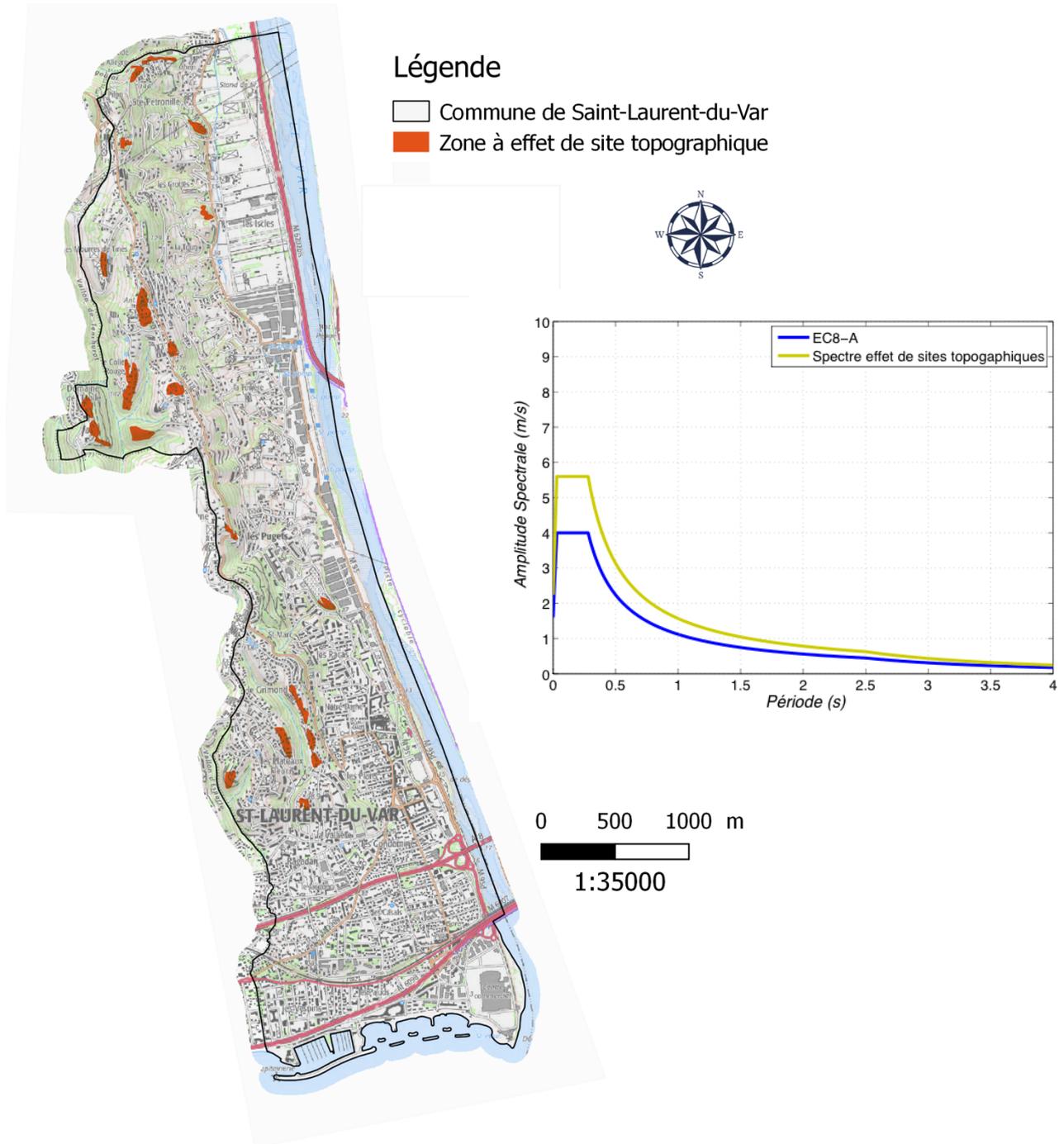


Figure 25 : Cartographie des zones à effets de site topographiques.

5 Conclusion

L'objet de cette étude, dans le cadre de la mise en place d'un Plan de Prévention du Risque Sismique, est la définition du microzonage sismique de la commune de Saint-Laurent du Var. Dans un premier temps, nous avons précisé l'accélération de référence au rocher en nous basant sur les études déjà réalisées sur la ville de Nice. Puis, nous avons défini des spectres de réponse en surface des alluvions tenant compte des effets de site sédimentaires mais ayant une forme réglementaire similaire à celle définie dans les Eurocodes 8. Un spectre spécifique a également été défini afin de prendre en compte les effets de site topographiques sur les collines de la ville.

La carte de microzonage finale comprend donc six zones, la zone 0, zone de référence au rocher, les zones de 1 à 4 délimitant les zones de réponse sismique homogènes dans les sédiments de la ville et finalement la zone 5 délimitant la zone où des effets de sites topographiques peuvent exister (Figure 26).

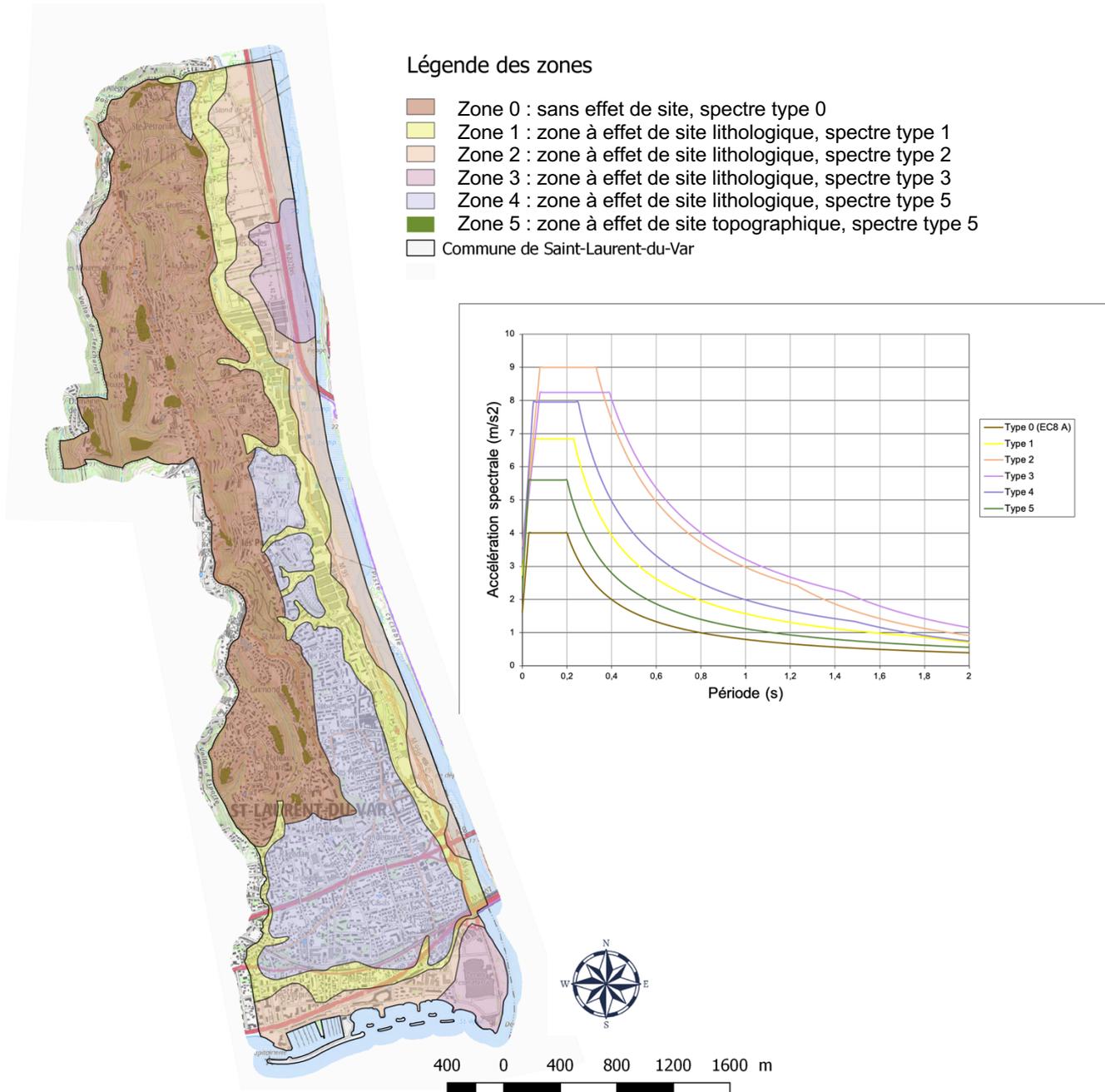


Figure 26 : Microzonage de la commune de Saint Laurent du Var et spectre de réponses élastiques à 5% d'amortissement associés.

Références bibliographiques

- Aki, K. (1957). Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors. *Bull. Earth. Res. Inst.*, Vol.35, pp 415-456.
- Boore D. (1973). The effect of simple topography on seismic waves : implications for the accelerations recorded at Pacoima Dam, San Fernando valley, California. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 63(5), 1603–1609.
- Cadet H., P.-Y. Bard, A.-M. Duval and E. Bertrand. Site effect assessment using KiK-net data: part 2—site amplification prediction equation based on f_0 and V_{sz} (2012). *Bulletin of earthquake Engineering*, Volume 10, pages 451-489, <https://doi.org/10.1007/s10518-011-9298-7>
- ERG Geotechnique, 2006, Projet de construction d'une crèche (Av. des orangers/Rue Teissere) SAINT LAURENT DU VAR (06700), Rapport d'étude géotechnique
- Kumar S. and J.P. Narayan (2008). Importance of quantification of local site effects based on wave propagation in seismic microzonation. *J. Earth Syst. Sci.* 117, S2, November 2008, pp. 731–748.
- Larroque C., B. Delouis, B. Godel, and J.-M. Nocquet (2009). Active deformation at the southwestern Alps–Ligurian basin junction (France–Italy boundary): Evidence for recent change from compression to extension in the Argentera massif. *Tectonophysics*, Volume 467, Issues 1-4, Pages 22-34, <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2008.12.013>
- Larroque C., O. Scotti and M. Ioualalen (2012). Reappraisal of the 1887 Ligurian earthquake (western Mediterranean) from macroseismicity, active tectonics and tsunami modelling. *Geophysical Journal International*, Volume 190, Issue 1, Pages 87–104, <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2012.05498.x>
- Makra K, K. Gelagoti F., Ktenidou O.-J. and K. Pitilakis (2012). Basin effects in seismic design: efficiency of numerical tools in reproducing complex seismic wavefields. *Proceedings of the 15th world conference of earthquake engineering*, 24-28 septembre, Lisbonne, Portugal.
- Makra K., and Chavez-Garcia J. (2016). Site effects in 3D basins using 1D and 2D models: an evaluation of the differences based on simulations of the seismic response of Euroseistest. *Bull. Earthquake Eng.* , vol. 14, pp.1177-1194. [https://doi.org/doi 10.1007/s10518-015-9862-7](https://doi.org/doi%2010.1007/s10518-015-9862-7)
- Mangan C., A. Emily et G.Tennevin (2012). Synthèse géologique de la basse vallée du Var (Alpes-Maritimes, France). Données nouvelles sur la structure profonde. *Ann. Mus. nat. Nice*, Pages 21-33.
- Maufroy, E., V. Cruz-Atienza, F. Cotton et S. Gaffet (2015). Frequency-Scaled Curvature as a proxy for topographic site-effect amplification and ground-motion variability. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 105, 354–367.
- Maufroy, E., V. Cruz-Atienza et S. Gaffet (2012). A robust method for assessing 3-D topographic site effects : A case study at the LSBB underground laboratory, France. *Earthquake Spectra* 28(3), 1097–1115.
- Maufroy, E., P. Lacroix, E. Chaljub, C. Sira, G. Grelle, L. Bonito, M. Causse, V. Cruz-Atienza, F. Hollender, F. Cotton et P.-Y. Bard (2018). Towards rapid prediction of topographic amplification at small scales: contribution of the FSC proxy and Pléiades terrain models for the 2016 Amatrice earthquake (Italy, Mw 6.0), 16th European Conference on Earthquake Engineering, 18-21 June.
- SESAME-WP12, 2004. Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations measurements, processing and interpretation, available at http://sesame-fp5.obs.ujf-grenoble.fr/Papers/HV_User_Guidelines.pdf
- Zevenbergen, L. et C. Thorne (1987). Quantitative analysis of land surface topography. *Earth surface processes and landforms* 12, 47–56.

Annexe 1 : Méthode H/V bruit de fond

Les bases de la méthode « H/V bruit de fond » ont été établies dès les années 1950 au Japon (voir Aki, 1957). Cette méthode est aujourd'hui de plus en plus utilisée pour identifier les sites présentant des risques d'amplification sismique afin de déterminer les fréquences de résonance. Sur le plan de l'expérimentation, la méthode consiste à poser un capteur de vibration tri-directionnel sur le sol à étudier. Le bruit ambiant est alors enregistré par une station d'acquisition sismologique durant quelques minutes.

Le traitement des trois traces sismiques (vertical, nord-sud et est-ouest) obtenues par enregistrement est le suivant :

- 1- Pour chaque enregistrement on recherche d'abord des fenêtres de signal dans lesquelles le signal est le plus stable (stationnaire) possible. Un traitement spectral est alors appliqué sur ces fenêtres ;
- 2- **H** représente l'amplitude spectrale lissée des composantes horizontales du bruit de fond sismique, obtenue par combinaison de l'amplitude spectrale des deux voies nord-sud et est-ouest ;
- 3- **V** représente l'amplitude spectrale lissée de la voie verticale du même enregistrement ;
- 4- Le rapport entre ces deux amplitudes spectrales est effectué sur plusieurs fenêtres de temps et le rapport moyen est donné en résultat.

La courbe résultante du traitement présente un pic à une fréquence correspondant à la fréquence de résonance du site, s'il existe un effet de site au point de mesure. En effet, les sites sur lesquels des phénomènes d'amplification sont attendus montrent des courbes H/V bruit de fond avec des pics alors que les mêmes courbes sont généralement plates sur des sites rocheux.

Matériel utilisé

Les enregistrements ont été effectués avec un enregistreur sismologique autonome et un capteur Lennartz.

Géophone

Le capteur utilisé est un sismomètre 3 composantes Güralp Systems CMG40. Les trois géophones (Vertical, transversal, longitudinal) ont une fréquence propre de 0,2 Hertz (5 secondes).

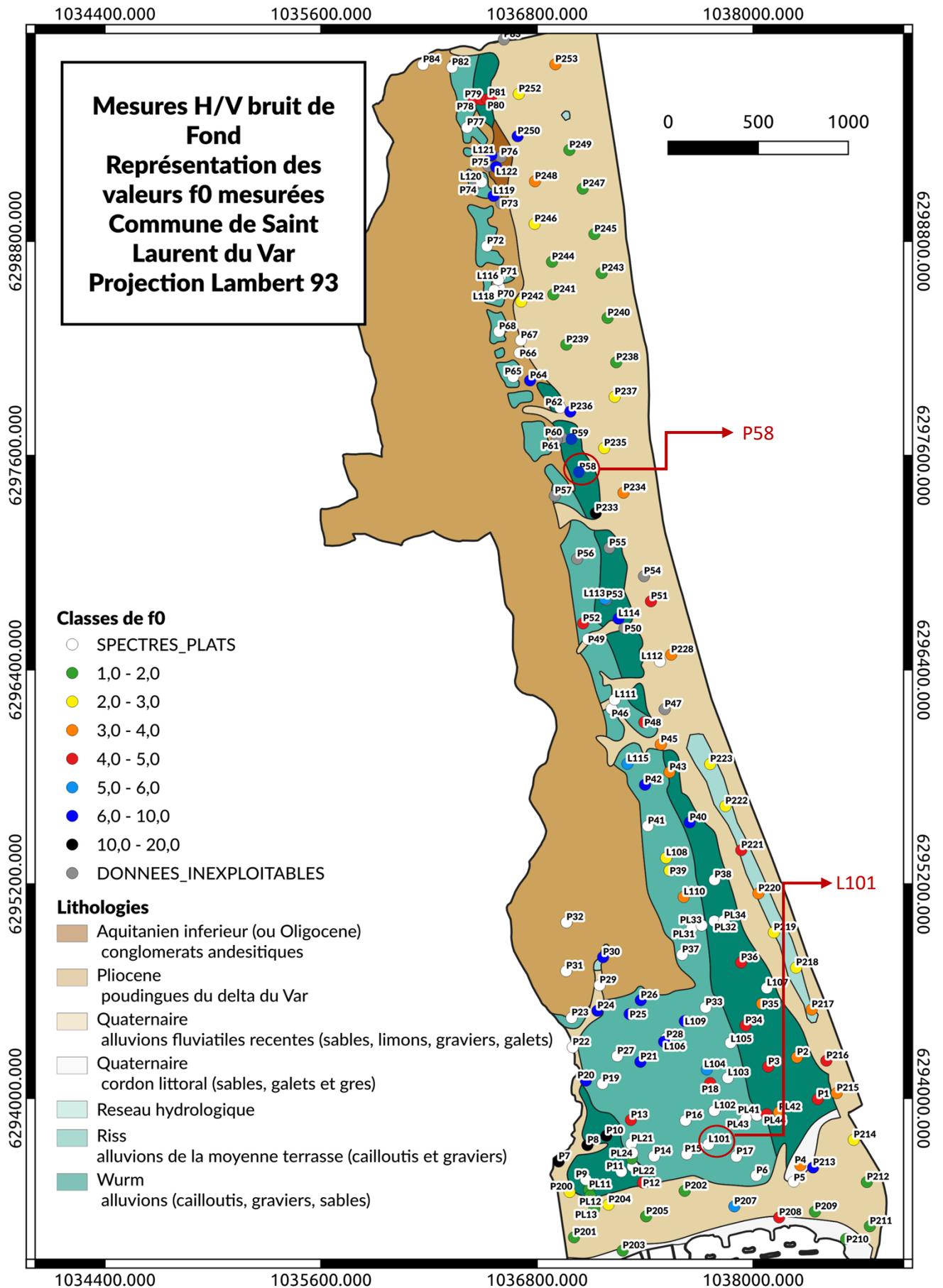
Leur transduction est de 400 microvolts/micromètre/seconde.

Station d'acquisition

La station d'acquisition est du type CMG-DM24 (fabricant : Güralp Systems). Elle comprend un amplificateur, un numériseur, un système horaire et un système de stockage de l'information. Cette station de 3 kilogrammes peut enregistrer un signal en continu depuis les 3 géophones avec une résolution de 24 bits et une fréquence d'acquisition pouvant aller jusqu'à 400 Hertz. Différents gains peuvent être utilisés. Les données sont stockées sur des mémoire flash de type clef USB.

Mise en œuvre sur la commune de Saint-Laurent du Var

Plus de 100 points de mesures ont été réalisés sur les contreforts de la vallée du Var situés sur la commune de Saint-Laurent du Var. La répartition géographique des points de mesures, avec celles déjà existantes dans la vallée du Var, est montrée sur la figure suivante.



Annexe 2 : Paramètres de la fonction SAPE

f_{ad}	α	X_{ref}	f_{ad}	α	X_{ref}
0.020000	0.151638	4.157870e+03	1.000000	0.560448	3.084586e+03
0.022601	0.179156	3.628819e+03	1.130037	0.523201	3.179319e+03
0.025540	0.255654	2.312019e+03	1.276984	0.538273	2.505328e+03
0.028861	0.292613	1.967178e+03	1.443040	0.591509	1.928865e+03
0.032614	0.309295	1.801183e+03	1.630689	0.606219	1.672039e+03
0.036855	0.291866	1.912819e+03	1.842740	0.595059	1.602305e+03
0.041647	0.306617	1.807635e+03	2.082365	0.660347	1.336757e+03
0.047063	0.350275	1.577306e+03	2.353150	0.696857	1.194511e+03
0.053183	0.349775	1.510139e+03	2.659148	0.682382	1.148692e+03
0.060099	0.385569	1.340007e+03	3.004937	0.640199	1.147484e+03
0.067914	0.435205	1.209805e+03	3.395691	0.583370	1.218432e+03
0.076745	0.448324	1.155830e+03	3.837257	0.554568	1.246814e+03
0.086725	0.417533	1.208525e+03	4.336244	0.492658	1.323607e+03
0.098002	0.428832	1.153207e+03	4.900118	0.432589	1.479003e+03
0.110746	0.464141	1.058203e+03	5.537317	0.413887	1.455551e+03
0.125148	0.489243	1.002596e+03	6.257375	0.368612	1.601620e+03
0.141421	0.493746	9.786288e+02	7.071068	0.261109	2.608582e+03
0.159811	0.507229	9.649424e+02	7.990571	0.229456	2.928580e+03
0.180593	0.490743	9.905453e+02	9.029644	0.186327	4.025199e+03
0.204077	0.485042	1.003475e+03	10.203835	0.148504	5.392700e+03
0.230614	0.502952	9.793942e+02	11.530715	0.107340	1.354288e+04
0.260603	0.514559	9.728509e+02	13.030140	0.073754	6.219034e+04
0.294491	0.514385	9.846413e+02	14.724545	0.109425	1.055023e+04
0.332786	0.524092	9.987840e+02	16.639286	0.105762	9.947692e+03
0.376060	0.524142	1.044547e+03	18.803015	-0.018861	1.578362e-06
0.424962	0.525872	1.123708e+03	21.248110	-0.148728	2.921748e+01
0.480223	0.521388	1.229010e+03	24.011159	-0.158605	3.900178e+01
0.542670	0.505320	1.439400e+03	27.133508	-0.247819	8.422648e+01
0.613238	0.493248	1.746805e+03	30.661878	-0.072591	7.174947e+00
0.692981	0.497864	2.050918e+03	34.649069	0.073158	1.014386e+04
0.783095	0.506650	2.468014e+03	39.154743	0.090718	5.923556e+03
0.884926	0.540402	2.863825e+03	44.246324	-0.703851	2.257342e+02



Cerema Méditerranée

Agence de Sophia Antipolis : 500 route des Lucioles CS80125 Valbonne 06903 Sophia Antipolis Cedex
Tel : 04 97 48 86 28 – mel : etienne.bertrand@cerema.fr

Plan de Pr

www.cerema.fr